

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**



***Estudio del Efecto del Cinturón de  
Seguridad y del Airbag en el Ocupante  
de un Vehículo en Caso de Colisión***

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica**

Autor:

**Manuel Moriche Guerrero**

Tutores:

**Dra. D<sup>a</sup>. Beatriz López Boada**

**Dr. D. Antonio Gauchía Babe**

**Julio 2008**



---

## ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	10
1.1	OBJETIVO .....	12
1.2	ESTRUCTURA DEL PROYECTO .....	13
2	SEGURIDAD EN VEHÍCULOS AUTOMÓVILES .....	15
2.1	SEGURIDAD ACTIVA.....	16
2.1.1	FRENOS .....	16
2.1.2	NEUMÁTICOS .....	17
2.1.3	LUCES.....	17
2.1.4	CONTROL DE TRACCIÓN.....	18
2.1.5	SISTEMA ANTI-BLOQUEO DE FRENOS .....	18
2.1.6	BLOQUEO ELECTRÓNICO DEL DIFERENCIAL .....	18
2.1.7	CONTROL DE ESTABILIDAD .....	19
2.2	SEGURIDAD PASIVA.....	20
2.2.1	CINTURÓN DE SEGURIDAD .....	20
2.2.2	ZONAS DE ABSORCIÓN DE IMPACTO.....	22
2.2.3	AIRBAG .....	22
2.2.4	ASIENTOS .....	23
2.2.5	REPOSACABEZAS .....	24
3	EL AIRBAG .....	25
3.1	HISTORIA DEL AIRBAG .....	26
3.2	PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL AIRBAG .....	28
3.3	SECUENCIA DE UN IMPACTO FRONTAL .....	31
3.4	COMPONENTES DEL AIRBAG .....	33
3.4.1	UNIDAD DE CONTROL .....	33
3.4.2	GENERADOR DE GAS .....	35
3.4.3	LA BOLSA DE AIRE .....	36
4	EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS .....	39
4.1	PROBLEMAS NO LINEALES .....	41
4.2	LS-DYNA .....	43
5	MODELO DE SIMULACIÓN.....	48
5.1	EL DUMMY .....	50



---

5.1.1	GEOMETRÍA.....	51
5.1.2	ACELERÓMETROS.....	52
5.2	EL VEHÍCULO.....	54
5.2.1	GEOMETRÍA.....	54
5.2.2	MATERIALES.....	56
5.3	EL CINTURÓN DE SEGURIDAD.....	57
5.3.1	GEOMETRÍA.....	57
5.3.2	MATERIALES.....	58
5.4	EL AIRBAG.....	60
5.4.1	GEOMETRÍA.....	61
5.4.2	MATERIALES.....	63
5.4.3	SIMULACIÓN DEL LLENADO.....	64
5.5	CONDICIONES DE CONTORNO.....	69
5.5.1	VELOCIDAD INICIAL.....	69
5.5.2	GRAVEDAD.....	69
5.5.3	ACELERACIÓN IMPUESTA.....	70
5.5.4	VEHÍCULO: CONEXIÓN Y DESPLAZAMIENTOS.....	71
5.5.5	CONTACTO: AIRBAG Y CINTURÓN.....	71
5.5.6	CONTACTO: ASIENTO.....	72
6	RESULTADOS.....	74
6.1	DIRECTIVA 96/79/CE.....	75
6.2	CASO A: CHOQUE FRONTAL CON CINTURÓN DE SEGURIDAD, SIN AIRBAG Y CONDICIÓN DE CONTACTO I.....	78
6.2.1	NORMA DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA.....	81
6.2.2	NORMA DE COMPRESIÓN DEL TÓRAX.....	82
6.2.3	NORMA DE LESIÓN DEL CUELLO.....	83
6.2.4	NORMA DE FUERZA DEL FÉMUR.....	85
6.3	CASO B: CHOQUE FRONTAL CON CINTURÓN DE SEGURIDAD, CON AIRBAG Y CONDICIÓN DE CONTACTO I.....	86
6.3.1	NORMA DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA.....	89
6.3.2	NORMA DE COMPRESIÓN DEL TÓRAX.....	90
6.3.3	NORMA DE LESIÓN DEL CUELLO.....	90
6.3.4	NORMA DE FUERZA DEL FÉMUR.....	92



---

6.4	CASO C: CHOQUE FRONTAL CON CINTURÓN DE SEGURIDAD, AIRBAG Y CONDICIÓN DE CONTACTO II .....	93
6.4.1	NORMA DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA.....	95
6.4.2	NORMA DE COMPRESIÓN DEL TÓRAX.....	96
6.4.3	NORMA DE LESIÓN DEL CUELLO .....	96
6.4.4	NORMA DE FUERZA DEL FÉMUR.....	98
6.5	RESULTADOS TERMODINÁMICOS: EL AIRBAG COMO VOLUMEN DE CONTROL.....	99
6.5.1	BALANCE DE MASA .....	99
6.5.2	DENSIDAD.....	101
6.5.3	PRESIÓN .....	102
6.5.4	TEMPERATURA .....	102
6.6	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	103
7	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	110
8	REFERENCIAS .....	113



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Ensayo de choque frontal, real y simulado .....	12
Figura 2-1: Sistema hidráulico de frenado .....	17
Figura 2-2: Habitáculo de un vehículo con cinturones de seguridad.....	20
Figura 2-3: Tensor pirotécnico (izquierda) y mecánico (derecha) .....	22
Figura 2-4: Habitáculo de un vehículo con airbags.....	23
Figura 3-1: Llenado de un airbag .....	29
Figura 3-2: Airbag deshinchado .....	29
Figura 3-3: Zona de influencia para la activación del airbag .....	30
Figura 3-4: Secuencia temporal de un impacto frontal .....	32
Figura 3-5: Esquema unidad de control .....	34
Figura 3-6: Generador de gas .....	36
Figura 3-7: Bolsa de aire con tirantes.....	38
Figura 4-1: Choque simulado con LS-DYNA .....	45
Figura 4-2: Pliegue de chapa simulado con LS-DYNA .....	45
Figura 4-3: Gráfica de fuerza frente a tiempo de LS-PrePost .....	46
Figura 4-4: Gráfica de desplazamiento frente a tiempo de LS-PrePost .....	47
Figura 4-5: Gráfica de fuerza frente a desplazamiento de LS-PrePost .....	47
Figura 4-6: Obtención del HIC-15 con LS-Prepost .....	47
Figura 5-1: Sistema de coordenadas del modelo de simulación .....	49
Figura 5-2: Dummy híbrido tipo III, real y modelo .....	52
Figura 5-3: Vista general de los acelerómetros .....	53
Figura 5-4: Acelerómetro de la cabeza .....	54
Figura 5-5: Vista general del vehículo.....	55



---

Figura 5-6: Asiento y anclajes acotados.....	55
Figura 5-7: Modelo del cinturón de seguridad .....	57
Figura 5-8: Cinturón de seguridad acotado.....	58
Figura 5-9: Función de carga del cinturón de seguridad .....	59
Figura 5-10: Función de descarga del cinturón de seguridad .....	59
Figura 5-11: Vistas superior e inferior del airbag.....	61
Figura 5-12: Vista frontal del airbag.....	61
Figura 5-13: Sección del airbag .....	62
Figura 5-14: Partes superior e inferior de la bolsa acotadas .....	63
Figura 5-15: Recipiente metálico acotado.....	63
Figura 5-16: Función de flujo másico de entrada del nitrógeno.....	67
Figura 5-17: Función de temperatura de entrada del nitrógeno .....	68
Figura 5-18: Función de aceleración impuesta .....	70
Figura 5-19: Función de fuerza frente a distancia.....	73
Figura 6-1: Fuerza máxima de tracción del cuello frente a duración de la carga dada .....	77
Figura 6-2: Fuerza máxima de cisión del cuello frente a la duración de la carga dada .....	77
Figura 6-3: Fuerza del fémur frente a la duración de la carga dada.....	78
Figura 6-4: Vista general, caso A .....	79
Figura 6-5: Secuencia de imágenes, caso A.....	80
Figura 6-6: HIC-36, caso A .....	81
Figura 6-7: Escalado del HIC-36, caso A .....	82
Figura 6-8: Compresión en el tórax, caso A.....	83
Figura 6-9: Cisión en el cuello, caso A .....	84



---

Figura 6-10: Tracción en el cuello, caso A .....	84
Figura 6-11: Esfuerzo en el fémur izquierdo, caso A .....	85
Figura 6-12: Esfuerzo en el fémur derecho, caso A.....	86
Figura 6-13: Vista general, caso B .....	87
Figura 6-14: Secuencia de imágenes, caso B.....	88
Figura 6-15: HIC-36, caso B .....	89
Figura 6-16: Compresión en el tórax, caso B.....	90
Figura 6-17: Cisión en el cuello, caso B .....	91
Figura 6-18: Tracción en el cuello, caso B .....	91
Figura 6-19: Esfuerzo en el fémur izquierdo, caso B .....	92
Figura 6-20: Esfuerzo en el fémur derecho, caso B.....	92
Figura 6-21: Vista general, caso C .....	93
Figura 6-22: Secuencia de imágenes, caso C.....	94
Figura 6-23: HIC-36, caso C .....	95
Figura 6-24: Compresión en el tórax, caso C .....	96
Figura 6-25: Cisión en el cuello, caso C .....	97
Figura 6-26: Tracción en el cuello, caso C .....	97
Figura 6-27: Esfuerzo en el fémur izquierdo, caso C .....	98
Figura 6-28: Esfuerzo en el fémur derecho, caso C.....	98
Figura 6-29: Flujo másico de salida del volumen de control .....	100
Figura 6-30: Masa en el interior del volumen de control .....	100
Figura 6-31: Volumen del volumen de control.....	101
Figura 6-32: Densidad del gas en el volumen de control.....	101
Figura 6-33: Presión en el interior del volumen de control .....	102



---

Figura 6-34: Temperatura en el interior del volumen de control .....	103
Figura 6-35: HIC-36, comparación .....	104
Figura 6-36: Aceleración de la cabeza, comparación .....	105
Figura 6-37: Compresión en el tórax, comparación.....	106
Figura 6-38: Cisión en el cuello, comparación .....	107
Figura 6-39: Tracción en el cuello, comparación.....	107
Figura 6-40: Fuerza en el fémur, comparación.....	108





---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Consolidación del método de los elementos finitos .....	41
Tabla 5-1: Unidades del modelo de simulación.....	50
Tabla 5-2: Parámetros de los materiales del modelo del vehículo .....	56
Tabla 5-3: Parámetros del material del cinturón de seguridad .....	60
Tabla 5-4: Tabla de propiedades de los materiales del airbag.....	64
Tabla 5-5: Tabla de propiedades de los gases participantes en el llenado del airbag.....	67
Tabla 5-6: Parámetros del volumen de control.....	68
Tabla 6-1: Tabla de resultados .....	109



# 1 INTRODUCCIÓN

---

La producción mundial de vehículos alcanzó en 2007 la cifra de 73,1 millones de unidades, lo que supone un aumento del 6,4 % respecto a los 69,33 millones de unidades del año anterior, según datos de la Organización Internacional de Constructores de Automóviles (OICA) que recoge Europa Press [1].

Ese mismo año, en España, hubo 2.741 víctimas mortales en accidentes de tráfico. El resultado es positivo si se compara con años anteriores. Esta cifra supone una reducción de víctimas mortales del 9 % respecto al año 2006. También supone volver a estar por debajo de las 3.000 víctimas mortales, cifra que se superaba con creces desde el año 1968. Hay que recalcar que en ese año circulaban 3.500.000 vehículos y en el 2007 lo hacían 29.700.000, por lo que el progreso es considerable. Aún así, es posible y se debe reducir más el número de víctimas de accidentes de tráfico. Para ello, a parte de campañas de concienciación, información y prevención, es necesario hacer una fuerte apuesta por los sistemas de seguridad en los vehículos, tanto por los que previenen los accidentes, como por los que, una vez que el accidente es inevitable, minimizan los daños producidos a sus ocupantes [2].



El avance de las tecnologías informáticas, tanto de software como de hardware, permite el estudio cada vez más preciso de situaciones reales mediante herramientas de simulación. El correcto uso de las herramientas disponibles permite predecir los resultados de un acontecimiento real. Las consecuencias son evidentes: una gran capacidad de adelantarse a situaciones no deseables y una gran reducción en costes de pruebas y ensayos. Hay que insistir en el “correcto uso”, ya que no hay que olvidarse de que no dejan de ser herramientas de simulación cuyos resultados deben confirmarse mediante pruebas y ensayos. El correcto uso de las herramientas depende del trabajo que realice el técnico responsable. Hay que insistir en que por muy desarrollada que esté la herramienta y mucha experiencia que tenga el técnico, son necesarias pruebas y ensayos que confirmen los resultados obtenidos en la simulación.

El método de los elementos finitos es hoy en día el procedimiento más potente para el análisis de estructuras de carácter uni, bi o tridimensional sometidas a las acciones exteriores más diversas. La característica más atractiva, y quizás también la más peligrosa, es que es un método aproximado. El método de los elementos finitos puede aportar información muy útil sobre el comportamiento de estructuras complejas para las cuales no existen soluciones analíticas disponibles, pero, si no se tiene la suficiente experiencia previa en su utilización, su carácter aproximado le confiere cierto riesgo [3].

En este proyecto se simula un choque frontal de un conductor que se encuentra en un vehículo automóvil con un programa de elementos finitos. El programa empleado para procesar la simulación es LS-DYNA y como herramienta para implementar el modelo y visualizar los resultados se ha utilizado LS-PrePost. Ambos programas están desarrollados por Livermore Software Technology Corporation [4]. LS-DYNA y LS-PrePost tienen una

gran especialización en el sector automovilístico, más en concreto, en términos de seguridad ante situaciones de impacto. LS-PrePost como pre-procesador tiene aplicaciones específicas para la implementación de airbags y cinturones de seguridad y como post-procesador permite la cómoda y rápida visualización de resultados, pudiendo obtener directamente parámetros específicos de la evaluación de daños en ocupantes de vehículos, como por ejemplo, la norma de comportamiento de la cabeza, que en capítulos posteriores se explica en que consiste. La Figura 1-1 muestra una imagen de un ensayo de choque frontal de un vehículo real y de uno simulado, el modelo de simulación mostrado pertenece a este proyecto.



**Figura 1-1: Ensayo de choque frontal, real y simulado**

## **1.1 OBJETIVO**

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un modelo de simulación de un choque frontal de un conductor que se encuentra en un vehículo turismo en LS-DYNA mediante LS-PrePost. También es objetivo de este proyecto demostrar la efectividad de los sistemas de seguridad instalados en el modelo, cinturón de seguridad y airbag, y reflejar la importancia del correcto uso de los programas de cálculo.



Debido a la complejidad de LS-DYNA y LS-PrePost el modelo de simulación que se desarrolla en este proyecto es sencillo, se pretende representar las características más generales del suceso. La complejidad de ambos programas se debe a la gran cantidad de fenómenos que tiene en cuenta LS-DYNA: comportamiento no lineal, interacción de estructuras con fluidos, algoritmos de contacto, fricción, transferencia de calor entre partes, y un largo etc...

No es objeto de este proyecto entrar en detalle de ninguno de los procesos que participan en la simulación, como por ejemplo, el llenado del airbag. Los valores asignados a los distintos parámetros que participan en los distintos procesos son valores típicos que se han encontrado en la literatura consultada. Sí es objeto de este proyecto modificar arbitrariamente alguno de estos parámetros para ver su repercusión en los resultados, por lo que se estudiarán tres casos distintos a partir del mismo modelo.

## **1.2 ESTRUCTURA DEL PROYECTO**

En los capítulos segundo y tercero, SEGURIDAD EN VEHÍCULOS AUTOMÓVILES y EL AIRBAG, se hace un planteamiento del estado del arte y una introducción a los sistemas de seguridad de los vehículos automóviles. En estos capítulos se muestran conceptos generales sobre la seguridad vial. En el capítulo segundo se clasifican los elementos de seguridad como elementos de seguridad activa o pasiva mientras que el capítulo tercero se centra en uno de ellos, el airbag, debido a la importancia que tiene en el modelo de simulación desarrollado en el proyecto.



En el capítulo cuarto, EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, se hace una introducción al método de los elementos finitos, en el cual se basan los programas empleados en la simulación, LS-DYNA y LS-PrePost.

Los capítulos quinto y sexto, MODELO DE SIMULACIÓN y RESULTADOS, muestran las características geométricas y físicas de las distintas partes que forman el modelo de simulación. En estos capítulos se explican los tres casos a estudiar, las simplificaciones llevadas a cabo, las condiciones de contorno y como no, los resultados obtenidos en cada uno de los casos haciendo una valoración de los mismos.

En el capítulo séptimo, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS, se exponen las conclusiones extraídas a partir de los resultados de la simulación y se proponen posibles estudios que tengan como punto de partida el modelo de simulación desarrollado en este proyecto.

En el capítulo octavo, REFERENCIAS, se enumera la literatura consultada para elaborar este proyecto de fin de carrera.



---

## 2 SEGURIDAD EN VEHÍCULOS AUTOMÓVILES

---

La cantidad de víctimas mortales debidas a los accidentes de tráfico hace que cada día se de más importancia a los sistemas de seguridad de los vehículos automóviles. Todas estas medidas de seguridad intentan evitar los accidentes o minimizar sus daños, pero nunca se debe olvidar que tan importantes como el desarrollo de estos sistemas de seguridad, son la educación al volante y las campañas de concienciación.

Debido a la importancia de la seguridad vial existen instituciones dedicadas exclusivamente a este campo, por ejemplo, el Insurance Institute for Highway Safety [5]. Sus investigadores se dedican a crear protocolos de ensayos que verifican el correcto funcionamiento de los sistemas de seguridad, hacen pruebas de choques frontales, laterales, elementos de seguridad aislados, etc... publicando posteriormente una relación de los vehículos ensayados ordenados en función de los resultados obtenidos.



Los elementos de seguridad de un vehículo se clasifican en elementos de seguridad activa o pasiva. Los elementos de seguridad activa son aquellos que intentan evitar un accidente y los de seguridad pasiva son aquellos que pretenden minimizar los daños de los ocupantes una vez que el accidente ya ha sucedido [6] [7].

## **2.1     *SEGURIDAD ACTIVA***

Los elementos de seguridad activa cubren un amplio abanico de sistemas, desde los frenos o las luces hasta sistemas electrónicos complejos como el sistema de frenos anti-bloqueo (ABS) o el sistema de control de estabilidad (ESP). Pueden ser activados por el conductor, como los frenos o que sean unidades de control las que, a partir de datos recogidos por sensores (acelerómetros, giróscopos, etc...) elaboran un diagnóstico y llevan a cabo un plan de actuación, todo ello en fracciones de segundo. A continuación se describen algunos de estos sistemas [8].

### **2.1.1 FRENOS**

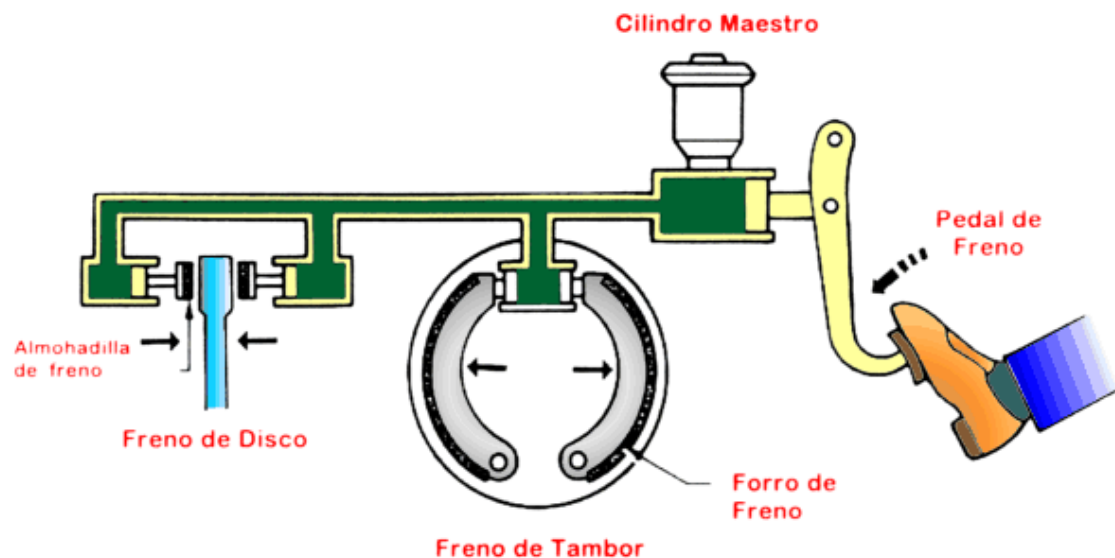
El sistema de frenado es el responsable de generar las acciones necesarias para que el vehículo se detenga. Para ello ha de estar en buen estado, cumpliendo siempre las revisiones programadas.

Actualmente, el sistema de frenado predominante es el hidráulico. Se compone principalmente de un sistema hidráulico y de materiales de fricción. El sistema hidráulico se encarga de transformar la fuerza ejercida en el pedal del freno en presión gracias a un cilindro conocido como "cilindro maestro", de aquí se distribuye a los mecanismos instalados en cada rueda donde los materiales de fricción entran en contacto y ejercen un





par contrario a la marcha que decelera el vehículo. Una característica básica de los materiales de fricción es que soportan altas temperaturas [6]. La Figura 2-1 muestra un esquema de un sistema de frenado hidráulico que acciona frenos de tambor y de disco.



**Figura 2-1: Sistema hidráulico de frenado**

### **2.1.2 NEUMÁTICOS**

Los neumáticos son el elemento de contacto entre el vehículo y la carretera. Un neumático en mal estado se traduce como una mala conexión con el medio. Por muy bueno que sea el comportamiento que es capaz de desarrollar el vehículo, si los neumáticos no están en buen estado, no son los apropiados o no están correctamente inflados, no se conseguirá la respuesta esperada.

### **2.1.3 LUCES**

El sistema de alumbrado es el conjunto de todos y cada uno de los dispositivos que advierten de la presencia de los vehículos a los demás



usuarios así como de las maniobras que van a realizar y proporcionan la visibilidad adecuada en caso de carecer de luz natural suficiente [7].

#### **2.1.4 CONTROL DE TRACCIÓN**

La finalidad del sistema de control de tracción es evitar el deslizamiento de las ruedas motrices. Cuando el control de tracción detecta que una rueda motriz está deslizando, disminuye la potencia entregada a ésta para que pueda recuperar el control y aumenta la potencia entregada a la que está adherida [6] [7].

#### **2.1.5 SISTEMA ANTI-BLOQUEO DE FRENOS**

El sistema antibloqueo de frenos, o más comúnmente conocido como ABS, evita que, en caso de frenada, las ruedas lleguen a bloquearse. Si las ruedas llegan a bloquearse, disminuye su adherencia a la carretera y por tanto su capacidad de frenada. El sistema consiste en un algoritmo iterativo en el que se frena hasta que la rueda se bloquea, en el momento que el sistema detecta el bloqueo, se descarga hasta que la rueda recupera su adherencia, momento en el que vuelve a frenar hasta que se vuelve a bloquear, y así, repetidas veces hasta que el coche se detiene. Con este sistema, La disminución de la longitud necesaria para el frenado es considerable [6] [7].

#### **2.1.6 BLOQUEO ELECTRÓNICO DEL DIFERENCIAL**

El bloqueo electrónico del diferencial es un sistema que fuerza a las dos ruedas de un mismo eje a girar a la misma velocidad. El que las ruedas giren a distinta velocidad puede estar provocado porque:



- Al acelerar, una de las ruedas esté menos cargada que la otra, gire más rápido y pierda tracción y potencia. Este sistema minimiza estas pérdidas y devuelve el control a la rueda.
- En una curva, la rueda interior describe una circunferencia menor que la exterior por lo que recorrerá menos distancia. Esta diferencia se ve compensada por el diferencial [6].

### **2.1.7 CONTROL DE ESTABILIDAD**

El control de estabilidad (ESP) es el que en caso de pérdida de control del vehículo lo devuelve a su trayectoria original. El vehículo describe una trayectoria que capta la unidad de control y la compara con la trayectoria teórica que debería llevar el vehículo. En el momento que éstas no coinciden el sistema se activa. Las causas de que esas trayectorias no coincidan son:

- Subviraje: La trayectoria real es una curva más abierta que la teórica.
- Sobreviraje: La trayectoria real es una curva más cerrada que la teórica.

Dependiendo del fabricante hay métodos de actuación distintos, pero todos se basan en frenar una o varias ruedas para producir un par que intente, en la medida de lo posible, devolver el vehículo a su trayectoria teórica. Si hubiera algún conflicto de actuación entre éste y otros sistemas de seguridad que actúen sobre los frenos, el control de estabilidad predomina sobre los demás sistemas [7].



## **2.2 SEGURIDAD PASIVA**

Los elementos de seguridad pasiva son aquellos que se activan cuando, incluso con la acción de los elementos de seguridad activa, el vehículo ha perdido el control. Como esta situación es posible y más frecuente de lo deseable, se desarrollan estos sistemas cuyo fin es el de minimizar los daños de los ocupantes [6] [8].

### **2.2.1 CINTURÓN DE SEGURIDAD**

El cinturón de seguridad es un arnés que mantiene al ocupante en su sitio en caso de deceleración brusca provocada por una colisión frontal. Las estadísticas demuestran que éste es el sistema de seguridad pasiva más efectivo. El cinturón de seguridad evita el llamado “segundo impacto”, que es el que sucede cuando el ocupante colisiona con partes duras del automóvil. La Figura 2-2 muestra el habitáculo de un vehículo dotado de cinturones de seguridad para conductor y pasajeros delanteros y traseros.



**Figura 2-2: Habitáculo de un vehículo con cinturones de seguridad**

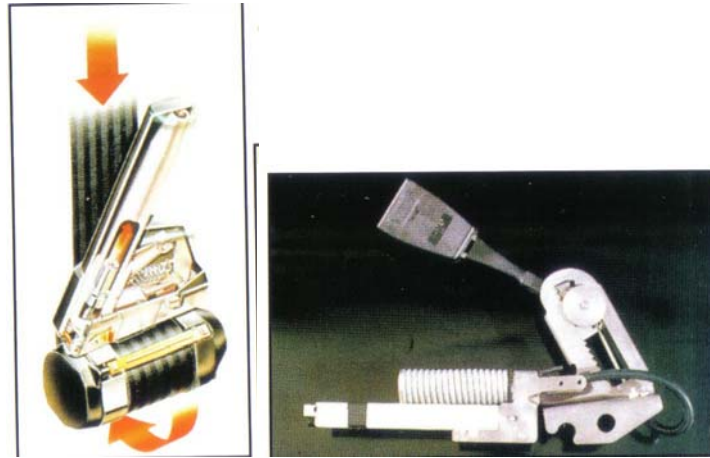


En un principio los cinturones de seguridad eran de un solo tramo que aseguraba la cadera. Más tarde, alrededor de los años 60, se hicieron también de un solo tramo, pero que asegurara el tronco superior. La combinación de ambos fue antes de los 70 y, más tarde, tuvo lugar su fusión, dando lugar al cinturón de seguridad de tres puntos que es el más común en los vehículos automóviles actuales.

El principal inconveniente del cinturón de seguridad de un tramo que aseguraba la cadera es que, en caso de accidente, provocaba una separación en las vértebras que en muchas ocasiones daba lugar a parálisis, conocida como el “síndrome del cinturón de seguridad”. El que aseguraba el tronco superior no conseguía fijar bien al ocupante, siendo fácil que deslice por el asiento en caso de colisión.

El cinturón de tres puntos fue inventado por el ingeniero Volvo Nils Bohlin (1920-2002). El primer coche en llevarlo de serie fue el Volvo Amazon. Hay que destacar la contribución de Volvo a la seguridad: inventó el cinturón de seguridad de tres puntos, lo patentó y liberó la patente para que el resto de fabricantes pudieran copiarlo y mejorar así la seguridad en los vehículos a nivel mundial.

Con el tiempo se ha ido mejorando, incluyendo el carrete inercial y pretensores, tanto pirotécnicos como mecánicos [9] [7]. La Figura 2-3 muestra ambos sistemas de mejora del cinturón de seguridad.



**Figura 2-3: Tensor pirotécnico (izquierda) y mecánico (derecha)**

### **2.2.2 ZONAS DE ABSORCIÓN DE IMPACTO**

Opuesto al concepto de robustez infinita que puede tener mucha gente en la cabeza con el fin de aumentar su seguridad, existe el concepto de deformación controlada, en el cual se absorbe energía del impacto y, por tanto, la energía que llega a los ocupantes es menor que la que se transmitiría con un vehículo excesivamente rígido. Con este concepto de deformación se desarrollan las carrocerías de los vehículos actuales [8].

### **2.2.3 AIRBAG**

El airbag es una bolsa de aire que sirve como colchón para los ocupantes ante una colisión. Es un sistema de seguridad complementario al cinturón de seguridad. Dentro del sistema airbag se pueden encontrar varios tipos que pueden ser clasificados según el lugar del vehículo en el que están instalados o la parte del cuerpo que están destinados a proteger [6]. A continuación se da una relación de los airbags más comunes y su función:

- El airbag de conductor es el que se encuentra en el volante y está destinado a protegerle en caso de choque frontal.



- El airbag de pasajero se encuentra en el salpicadero y está destinado a protegerle en caso de choque frontal.
- El airbag lateral se encuentra en puertas o en la estructura del techo y su función es actuar como barrera entre los ocupantes, tanto traseros como delanteros, ante un choque lateral.

En este proyecto se estudia el comportamiento de un airbag típico de conductor, por eso se le dedica un capítulo entero (capítulo 3 ). La Figura 2-4 muestra el habitáculo de un vehículo con airbag de conductor, pasajero y laterales completamente hinchados.



**Figura 2-4: Habitáculo de un vehículo con airbags**

#### **2.2.4 ASIENTOS**

Los asientos modernos confieren seguridad al ocupante de varias maneras. Su geometría está específicamente diseñada para que, en caso de accidente no se produzca deslizamiento del ocupante, algunos, además tienen sistemas que permiten su movimiento hacia atrás en caso de colisión trasera, disminuyendo así el latigazo producido en el cuello.



---

### **2.2.5 REPOSACABEZAS**

El reposacabezas evita el latigazo hacia atrás que tiene lugar por una colisión trasera o como reacción de una colisión frontal. Como todos los sistemas de seguridad, han de ajustarse a su usuario, siendo peligroso un mal funcionamiento, por ejemplo, que esté demasiado bajo aumenta el riesgo de lesiones, ya que la cabeza tiende a trepar por él [8].





---

## 3 EL AIRBAG

---

El airbag es un sistema de retención suplementario (en inglés Supplementary Restrain System, SRS) que disminuye la posibilidad de sufrir daños irreparables hasta en un 30% siempre que actúe conjuntamente con el cinturón de seguridad, de ahí su definición de suplementario. Este proyecto va a estudiar los efectos de un airbag frontal típico de conductor. El airbag frontal de pasajero es muy similar al de conductor aunque difiere en su forma, tiempos de llenado, etc... y los airbags laterales, a pesar de las analogías que pueden tener con los frontales, trabajan de forma muy distinta y llevan a cabo funciones diferentes.

Si se analiza un choque frontal de un vehículo se distinguen principalmente dos impactos, el que sucede entre el vehículo y el agente externo (muro, otro vehículo, etc...), denominado primer impacto, y la colisión de los ocupantes contra las partes internas del vehículo, denominado segundo impacto. El airbag juega un papel muy importante en el segundo impacto ya que, como se va a ver a continuación, evita en la medida de lo posible que ocurra.



Las leyes de la mecánica establecen que un cuerpo, de masa  $m$  con una velocidad  $v$ , lleva asociado un momento cinético de valor  $m \cdot v$ . Para variar el momento cinético de un cuerpo es necesario aplicarle una fuerza  $F$  durante un determinado tiempo  $t$ , siendo el producto de ambos factores el impulso ejercido  $F \cdot t$ . Ante una variación del momento cinético, la velocidad inicial, la final, la fuerza aplicada y el tiempo de aplicación están relacionados de la siguiente forma:

$$m \cdot v_1 + F \cdot t = m \cdot v_2$$

Donde  $m$  es la masa del cuerpo,  $v_1$  es la velocidad inicial,  $v_2$  es la velocidad final,  $F$  es la fuerza aplicada y  $t$  el tiempo de aplicación de la fuerza. Si se despeja la fuerza en la ecuación, queda:

$$F = \frac{m \cdot (v_2 - v_1)}{t}$$

En un choque frontal,  $v_2$  es cero y  $v_1$  es la velocidad a la que circulaba el vehículo antes del impacto. Es entonces el tiempo el que va a definir el valor de la fuerza. Si el llamado segundo impacto tiene lugar contra partes duras del vehículo como el volante, el parabrisas o el salpicadero, el tiempo de aplicación de la fuerza es despreciable, prácticamente cero, por lo que la fuerza alcanza valores muy grandes provocando lesiones graves e incluso mortales. El airbag se interpone entre el torso y cabeza de los ocupantes y las partes duras del vehículo aplicando una fuerza de menor valor durante un periodo de tiempo mayor, de modo que, el valor máximo alcanzado por la fuerza esté siempre dentro de valores admisibles por el cuerpo humano [6].

### **3.1 HISTORIA DEL AIRBAG**

La idea de un cojín flexible para disminuir las consecuencias de los impactos frontales de los automóviles data de la década de los 20, pero la primera



patente de un sistema practicable se realizó a principios de los años 50. El airbag es un invento nacido en América y perfeccionado en Europa, donde, concretamente en Alemania, existe una patente del 6 de octubre de 1951 a nombre de Walter Linderer de lo que hoy se conoce como airbag.

Durante los años 50 los fabricantes dejaron de lado el airbag y se centraron en otros sistemas de retención como el cinturón de seguridad hasta que, en 1967, Mercedes Benz compró la patente y tomó la decisión de desarrollar el airbag en el centro de seguridad que tenía en Sindelfingen con el fin de implantarlo como mecanismo salvavidas en los vehículos.

Durante el desarrollo, las pruebas de funcionamiento revelaron el primer inconveniente, el llenado de la bolsa. Las primeras investigaciones para establecer el tiempo en el que debía completarse el proceso de llenado, establecieron que, desde el principio del accidente hasta el completo inflado de la bolsa debían transcurrir 30 milésimas de segundo. Los primeros sistemas de alimentación de aire se basaban en grandes botellas a alta presión cuya instalación era demasiado compleja como para ser viable. Se probaron combinaciones de gas líquido con una pequeña cantidad de keroseno sólido y finalmente se afianzó como sistema de llenado el generador de gas pirotécnico. Era más pequeño, ligero y seguro, tanto para la conducción como para su almacenamiento en talleres. Por otro lado, la electrónica también fue un obstáculo, se convirtió en la parte del airbag que más tiempo llevo desarrollar. El principal motivo era el escaso desarrollo de componentes electrónicos existente, ya que no ocupaban un lugar tan destacado como hoy en día.

Igual que Volvo con el cinturón de seguridad de tres puntos, Mercedes Benz dejó libre la patente para que el resto de fabricantes pudiera emplear la tecnología desarrollada. Éstos así lo hicieron y progresivamente fueron



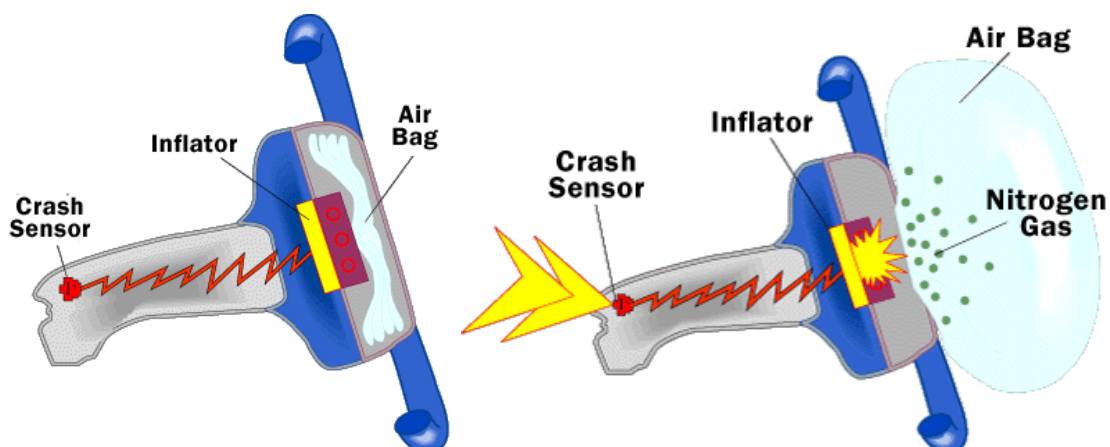
incorporándolo a sus modelos hasta el día de hoy, en el que el airbag viene de serie en muchos modelos del mercado y en prácticamente todos es posible incluirlo a precios razonables.

En la actualidad las investigaciones siguen adelante optimizando cada vez más los sistemas de llenado, electrónicos, los materiales, etc... Además, distintos tipos de Airbag son cada vez más frecuentes, como los laterales o traseros [6].

### ***3.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL AIRBAG***

A grandes rasgos, el airbag frontal es una bolsa de tejido ultrarresistente plegada y alojada frente al ocupante, en el volante o en el salpicadero según sea conductor o copiloto. Como se ha visto previamente, el funcionamiento del airbag es, en principio, sencillo. La complejidad radica en la precisión y rapidez de accionamiento.

El vehículo dispone de sensores cinemáticos que detectan desaceleraciones bruscas y emiten una señal a la unidad de control que, gracias a un algoritmo implementado, es la responsable de activar el conjunto del generador de gas. Este generador de gas se encuentra situado junto a la bolsa de aire y contiene un compuesto químico sólido. Su detonación genera nitrógeno gaseoso suficiente para llenar la bolsa en milésimas de segundo. La Figura 3-1 muestra el proceso de llenado del airbag.



**Figura 3-1: Llenado de un airbag**

Inmediatamente después del llenado comienza el desinflado de la bolsa mediante la salida controlada del gas bajo la presión producida por el ocupante al chocar contra la bolsa. Este proceso de desinflado tiene lugar a través de unos orificios en su parte posterior. Una vez que ha cumplido su función, el airbag queda totalmente vacío permitiendo libertad de movimientos al ocupante. La Figura 3-2 muestra un airbag deshinchado.

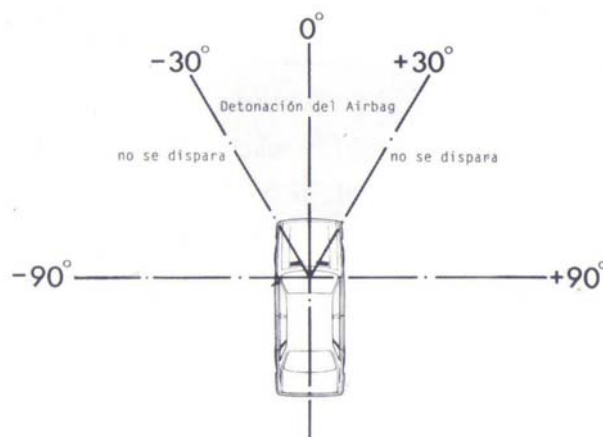


**Figura 3-2: Airbag deshinchado**

Los airbags frontales, tanto de conductor como de acompañante, sólo se activan si el ángulo de incidencia del vehículo contra el agente externo se encuentra dentro de un rango de  $\pm 30^\circ$  con respecto al eje longitudinal del



vehículo (este valor es orientativo, puede variar de un fabricante a otro). La Figura 3-3 muestra la zona de influencia para la apertura del airbag.



**Figura 3-3: Zona de influencia para la activación del airbag**

En el caso de impactos laterales, traseros o en caso de vuelco no se debe activar ya que no ofrece protección alguna. Sólo debe activarse en caso de deceleraciones bruscas equivalentes a un choque frontal contra un muro a 30 *km/h* (valor orientativo). Por debajo de este valor se considera suficiente la acción del cinturón de seguridad. Tampoco se debe activar como respuesta a baches de la carretera, canto de un bordillo, etc....

Las características generales de un airbag son siempre las mismas, pero de un fabricante a otro puede haber ciertas diferencias en los materiales, tamaño, algoritmos que implementa la unidad de control, etc.... Debido que el airbag está totalmente integrado con el vehículo, un airbag no se puede adquirir como un sistema independiente e instalarlo, sino que ha de ser en el proceso de fabricación del vehículo cuando se integre en él [6] [7].

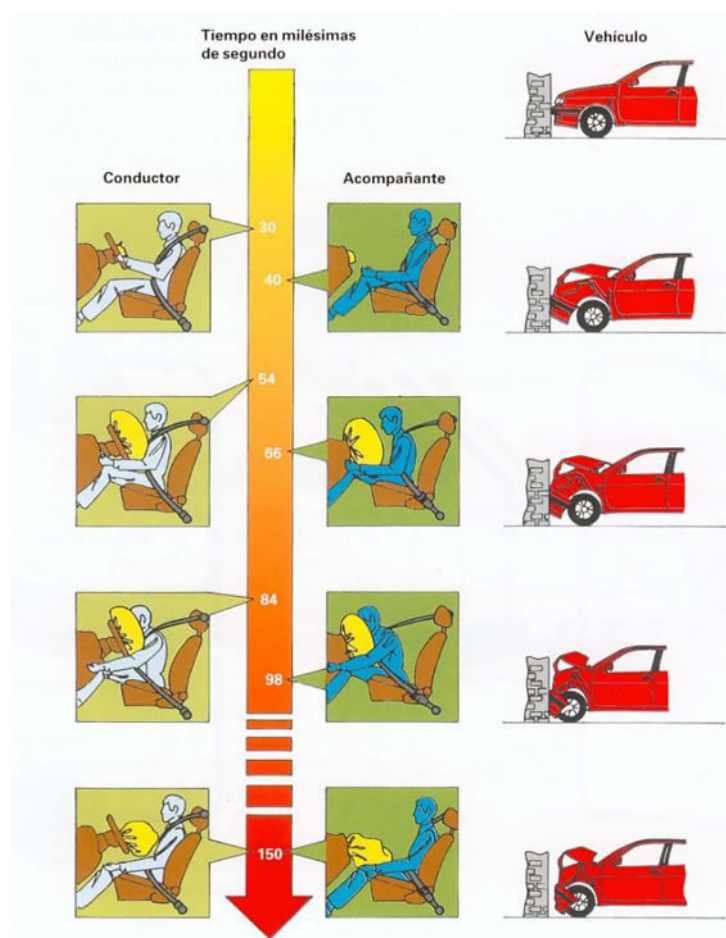


### **3.3 SECUENCIA DE UN IMPACTO FRONTAL**

Debido a la gran rapidez con que suceden los hechos en un impacto, la unidad de medida del tiempo son las milésimas de segundo o milisegundos (*ms*). En un choque tipo a 54 *km/h* contra una barrera rígida, la secuencia de acontecimientos es la que se describe en los siguientes párrafos y se puede ver representada en la Figura 3-4 (los valores numéricos aportados en este apartado son aproximados y de carácter orientativo).

En el momento del impacto el conductor está en posición normal. Transcurridos 20 *ms* se alcanza el valor de desaceleración que activa el airbag, el conductor todavía está en posición erguida. A los 30 milisegundos del choque se hincha el airbag. El conductor empieza a desplazarse hacia delante y el cinturón se ajusta y se dilata absorbiendo parte de la energía del choque. 50 milisegundos después el airbag queda completamente hinchado. Es en este instante cuando el conductor comienza a hundirse en la bolsa de aire. He aquí una de las razones del uso conjunto del cinturón de seguridad y el airbag: el momento en el que el ocupante entra en contacto con el airbag, éste ha de estar totalmente hinchado para actuar como una membrana y ejercer una presión repartida en la superficie de la bolsa. Si el ocupante prescinde del uso del cinturón de seguridad recorrerá una distancia mayor de la esperada y entrará en contacto con el airbag cuando éste está en el proceso de llenado, si esto ocurre, la bolsa ejercerá una gran presión localizada que puede provocar lesiones en el ocupante. De no ser así porque el ocupante ha recorrido más distancia de la que se espera si se usa el cinturón de seguridad, el airbag estará en proceso de llenado cuando el ocupante entre en contacto con él y ejercerá una gran presión localizada que provocará lesiones en el ocupante. La velocidad de desinflado del airbag está calculada. Siguiendo la secuencia temporal, a los 80 milisegundos del

impacto, la cabeza y parte superior del conductor se han sumergido hasta la profundidad máxima del airbag. El airbag continúa su desinflado. A los 110 milisegundos el airbag se ha vaciado en gran medida y el ocupante comienza a retroceder hacia el asiento. Pasados 150 milisegundos el choque ha finalizado. El airbag está desinflado casi por completo y el conductor ha vuelto a su posición original.



**Figura 3-4: Secuencia temporal de un impacto frontal**

En el caso del acompañante todo el proceso sucede algunos milisegundos más tarde. Las principales diferencias son un mayor espacio entre el ocupante y la parte delantera del vehículo y una bolsa mayor que necesita más tiempo para llenarse.





Como se advierte previamente estos tiempos son aproximados y de carácter orientativo, pero suficientes para darse cuenta del pequeño intervalo temporal en el que lleva a cabo su función el airbag. El proceso completo tiene lugar en aproximadamente 200 *ms* [6] [7].

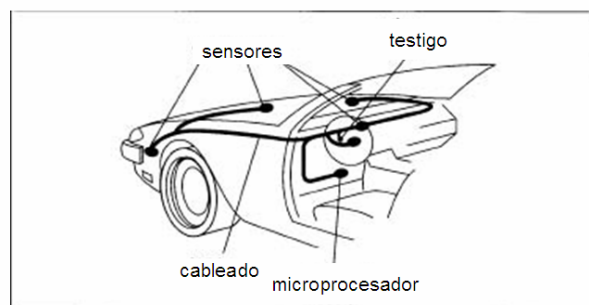
### **3.4 COMPONENTES DEL AIRBAG**

El típico sistema Airbag consiste en el módulo de la bolsa de aire, los sensores de choque, la unidad de control, un conector específico para el volante y un testigo. Estos componentes están conectados mediante cables. El módulo de la bolsa de aire se compone de un soporte metálico, un generador de gas, una bolsa hinchable y una tapa almohadillada. En los siguientes apartados se hace una descripción más detallada de los principales componentes de un airbag típico de conductor.

#### **3.4.1 UNIDAD DE CONTROL**

La unidad de control también se puede ver representada por las siglas ACU (en inglés Airbag Control Unit) o ECU (en inglés Electronic Control Unit). Se encuentra situada en el túnel de la caja de cambios. La Figura 3-5 muestra un esquema de la unidad de control. A continuación se muestra la relación de sus componentes:

- Sensor de colisión, que mide la deceleración.
- Interruptor de mercurio.
- Microprocesador.
- Unidad de alimentación.



**Figura 3-5: Esquema unidad de control**

El sensor de colisión mide la intensidad de las fuerzas de frenado determinando la deceleración en el sentido longitudinal del vehículo y emitiendo una señal cuando la deceleración alcanza un determinado valor durante un intervalo de tiempo mínimo. En los sistemas más simples se utilizan sensores de choque electromecánicos de alta precisión y en los más avanzados cuarzos piezoeléctricos.

El interruptor de mercurio mantiene interceptado el circuito de ignición del airbag, sólo permite que se produzca ignición cuando se produce una deceleración del coche anormalmente brusca para las posibilidades del automóvil. Por ejemplo, en el caso de Ford, se establece una deceleración igual o mayor a 2 g's. Este interruptor está montado en serie con el sensor de colisión de forma que, sólo con la activación de ambos, se dispara el sistema evitando activaciones erróneas.

Debido a que el sistema puede quedar inactivo durante años, estos sensores son comprobados cada vez que se da el contacto y durante la marcha del vehículo. Mediante una lámpara de control o testigo en el cuadro de instrumentos se indica que el sistema se halla en disposición de funcionamiento.



La unidad de alimentación se encarga de almacenar energía para que, en caso de fallo eléctrico, el sistema funcione correctamente. Dependiendo de cada fabricante, el tiempo disponible una vez cortada la alimentación varía entre un segundo y diez minutos.

El microprocesador tiene implementado un algoritmo que es el que interpreta los datos recibidos de los sensores. Al alcanzarse los valores de umbral determinados, el microprocesador envía pulsos eléctricos al generador de gas. La unidad de control no tiene porque ser exclusiva del airbag, puede interferir también en otros sistemas como por ejemplo, el cinturón de seguridad. El algoritmo implementado puede diferenciar dos umbrales, uno en el cual sólo se activen los sensores del cinturón de seguridad y otro, más alto, en el que se activen tanto éstos como la ignición del airbag.

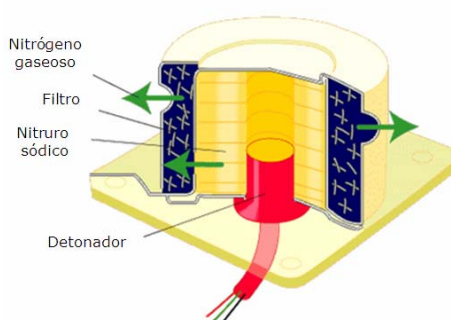
La caja y los puntos de conexión eléctricos están configurados para funcionar incluso con la acción de variables perturbadoras como radiaciones electromagnéticas o la conexión de consumidores eléctricos [6].

### **3.4.2 GENERADOR DE GAS**

El generador de gas es un dispositivo pirotécnico que contiene combustible sólido duradero al paso del tiempo y que va sellado en el interior de una cámara de combustión hecha de acero de alta resistencia. El combustible lo forman pastillas de nitruro sódico ( $\text{Na}_3\text{N}$ ) dispuestas radialmente en el interior de la cámara de combustión. En el centro de la cámara de combustión se sitúa la cápsula de ignición que posee una carga explosiva distinta. Cuando el sistema se activa, el pulso recibido desde la unidad de control detona esta carga que desencadena la combustión de las pastillas. El resultado de la combustión es nitrógeno en estado gaseoso que pasa a



través de un filtro que, además de filtrar partículas resultantes de la combustión, tiene un efecto refrigerante. El filtro es una red de cable de acero inoxidable con material cerámico a modo de sándwich. La Figura 3-6 muestra un generador de gas típico.



**Figura 3-6: Generador de gas**

No todos los generadores de gas están basados en combustibles sólidos. Pueden utilizar gas comprimido en cilindros auxiliares o mezclar ambos sistemas. Una de las principales ventajas del gas comprimido es que el gas sale a baja temperatura, es aire frío, lo cual permite emplear materiales más ligeros y baratos en las bolsas [6].

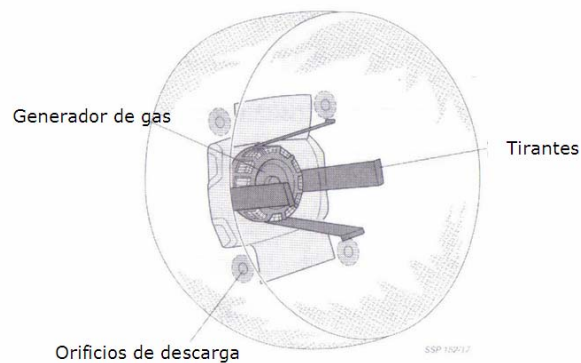
### **3.4.3 LA BOLSA DE AIRE**

La bolsa de aire va unida al generador de gas y se encuentra plegada de forma muy compacta debajo de la tapa del volante o del salpicadero. Va envuelta en una bolsa de plástico diseñada para romperse en caso de inflado cuya función es la de preservar las cualidades del tejido. El interior de la bolsa contiene unas bandas o tirantes que controlan el proceso de llenado. En la parte posterior de la bolsa se practican dos orificios para que el gas se escape controladamente. La bolsa está elaborada de un tejido a base de nylon o poliamida que puede estar revestido en su interior por una



capa de neopreno o silicona. La función del revestimiento es proteger la bolsa de las temperaturas alcanzadas por el gas de llenado o algún resto caliente de la combustión que el filtro no haya podido retener. Además se le echan polvos de talco o fécula de maíz para evitar que, una vez doblado, se adhieran las partes adyacentes. Las bolsas tienen un volumen que puede variar entre 60 y 80 litros para el airbag de conductor y entre 150 y 200 litros para el airbag del acompañante.

Se pueden distinguir cuatro etapas en la evolución de las bolsas de aire. En la primera, la tela era tejida con un nylon basto y pesado y se necesitaba una capa considerable de neopreno para proteger la superficie de la bolsa. En esta etapa se utilizaba mucho polvo de talco. En la segunda etapa se utilizaba un nylon no tan basto. Prácticamente se duplicó la densidad del tejido pero, al reducirse notablemente el espesor, disminuyó su peso total. En la tercera etapa se introduce el nylon 6.6 de gran resistencia y poco peso. Se consigue un entramado más suelto lo que la hace más ligera y suave. Se facilitaron las operaciones de empaquetamiento y el contacto con la piel humana era menos agresivo. La cuarta etapa está caracterizada por la aparición de tirantes internos que evitan la intrusión de la bolsa en el espacio del conductor y además favorecen la expansión lateral de la bolsa. Evitar la intrusión de la bolsa en el espacio del ocupante es importante ya que se han registrado velocidades de hasta 450 *km/h* en el despliegue de la bolsa. La expansión lateral de la bolsa ayuda a aumentar la efectividad del sistema ante el llamado "conductor fuera de posición". Una bolsa con tirantes se llena antes que una bolsa sin ellos. La Figura 3-7 muestra una bolsa de aire con tirantes incorporados.



**Figura 3-7: Bolsa de aire con tirantes**

Otro factor importante en la evolución de la bolsa de aire es la introducción de la silicona para sustituir al neopreno. El neopreno no es del todo compatible con el nylon y se vuelve frágil con el tiempo por lo que la bolsa va perdiendo propiedades. En cambio las propiedades de la silicona se mantienen inalteradas durante largos periodos de tiempo incluso a temperaturas extremas. La silicona está considerada químicamente inerte, por lo que no interfiere en las propiedades del nylon. El resultado es que permite aplicar capas más finas y conseguir bolsas más compactas. Con el fin de eliminar los orificios de salida existen diseños híbridos llamados "telas porosas". Tienen zonas con recubrimiento (las sometidas a altas tensiones) y zonas sin él. La descarga se efectúa por la porosidad del tejido. El inconveniente es que no se desinflan tan rápidamente como con los orificios tradicionales y que lo hacen de una forma menos predecible. [6]



## 4 EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

---

Debido a la complejidad del mundo que nos rodea, el ser humano es incapaz de captar la realidad directamente, por lo que, ingenieros, matemáticos, científicos e incluso economistas, dividen un sistema en sus componentes individuales o "elementos", cuyo comportamiento puede ser analizado fácilmente, para, con los resultados obtenidos de cada elemento, reconstruir el sistema original y obtener el comportamiento global. Al hacer esta división, se puede llegar a un modelo con un número finito de componentes bien definido o la subdivisión puede proseguir indefinidamente y conducir a ecuaciones diferenciales o expresiones equivalentes con un número infinito de elementos implicados. A los primeros sistemas se les conoce como discretos y a los segundos como continuos.

Gracias al uso de los ordenadores, los problemas discretos son fácilmente resolubles, pero debido a su capacidad limitada, los problemas continuos sólo se pueden resolver de forma exacta mediante operaciones matemáticas. Las técnicas matemáticas disponibles actualmente suelen



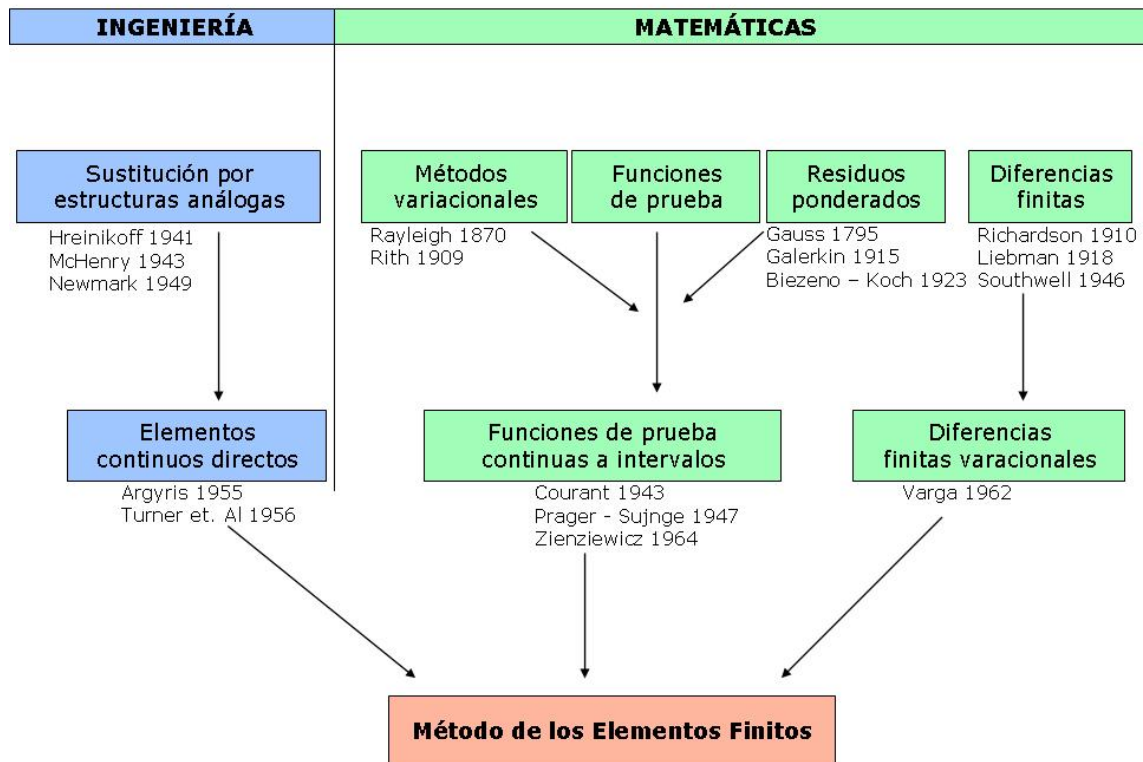
---

limitar el análisis de sistemas continuos a casos extremadamente simplificados.

Debido a la constante necesidad de analizar problemas continuos reales, ingenieros y matemáticos han ido proponiendo a través de los años diversos métodos de discretización. Para ello, han de efectuarse aproximaciones, que, como es evidente, no han sido abordadas de la misma forma por matemáticos que por ingenieros. Los matemáticos han desarrollado técnicas generales para la resolución de ecuaciones diferenciales mientras que los ingenieros, se han enfrentado a los problemas creando analogías entre un dominio continuo y elementos discretos reales, siendo a estos a los que se les atribuye el nacimiento de la expresión “elemento finito”. Pero es mérito de ambas ciencias, las matemáticas y la ingeniería, la consolidación del método de los elementos finitos como un procedimiento general de discretización de problemas continuos reales.

En la Tabla 4-1 se muestra la consolidación del método de los elementos finitos como la integración de distintas técnicas de análisis haciendo referencia a los principales protagonistas de cada técnica y al año en el que la desarrollaron.





**Tabla 4-1: Consolidación del método de los elementos finitos**

La principal aplicación de este método, y objeto de este proyecto, ha sido el cálculo de estructuras, pero cabe señalar que se emplea también para redes de componentes eléctricos, conducciones hidráulicas y campos electromagnéticos [10].

## **4.1 PROBLEMAS NO LINEALES**

Una gran y útil simplificación llevada a cabo en el cálculo estructural es el comportamiento lineal, tanto geométrico como material. La realidad es, que como todas las aproximaciones, tiene limitaciones.



El comportamiento lineal geométrico es aceptable siempre que tengan lugar pequeñas deformaciones, así, las cargas y las condiciones de contorno pueden estar referidas a la estructura inicial (sin deformar) y se pueden hacer ciertas aproximaciones como por ejemplo:

$$\left. \begin{array}{l} \text{seno}(\alpha) \approx \alpha \\ \text{tan}(\alpha) \approx \alpha \end{array} \right\} \Leftrightarrow \alpha \text{ pequeño}$$

Pero cuando los desplazamientos adquieren cierto valor, el comportamiento real de la estructura comienza a diferir del supuesto lineal. Si se observan las ecuaciones anteriores, sólo se cumplen para valores de  $\alpha$  cercanos al cero.

El comportamiento no lineal del material puede manifestarse de varias formas, pero siempre con una característica común: la tensión no es linealmente proporcional a la deformación. Por ejemplo, en el comportamiento elastoplástico clásico, la respuesta del material ante carga es distinta a la respuesta ante descarga; el comportamiento viscoelástico se caracteriza por el hecho de que la velocidad a la que se desarrollan las deformaciones inelásticas depende no sólo del estado actual de tensión y deformación sino, en general, de la historia completa de su evolución [11].

El objeto de introducir el comportamiento no lineal de las estructuras se debe a que en un choque frontal de un vehículo aparece constantemente el fenómeno de no-linealidad. Tienen lugar grandes deformaciones y los materiales responsables de absorber el impacto entran en la denominada zona plástica, en la que desaparece la linealidad entre tensión y deformación.



## **4.2 LS-DYNA**

LS-DYNA es un código de elementos finitos multi-propósito que analiza grandes deformaciones de problemas estáticos o dinámicos de estructuras incluyendo su interacción con fluidos [12] [13]. Algunas de sus características más generales se indican a continuación:

- El método está basado en integración explícita.
- Un algoritmo de impacto y contacto permite tratar problemas complejos de la realidad, incluyendo transferencia de calor a través de las superficies en contacto.
- La especialización del algoritmo de contacto hace que no sea necesario mallar las zonas de transición para obtener resultados fiables.
- Ofrece una gran variedad de formulaciones para cada elemento.
- Gran especialización en la industria del automóvil. Airbags, cinturones de seguridad y sensores son un ejemplo de ello.
- Para elementos bi-dimensionales es capaz de refinar la malla durante el procesado en función de los resultados para obtener así mayor precisión en las zonas que la requieran.
- Aproximadamente 100 modelos y 10 ecuaciones de estado abarcan un amplísimo rango de comportamiento material.

El origen de LS-DYNA tiene lugar a mediados de los setenta, con el software "DYNA3D" que fue desarrollado en el Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL).

La primera versión de DYNA3D fue estrenada en 1976. Para compilar se empleaban máquinas como el CDC-7600, un súper ordenador cuya



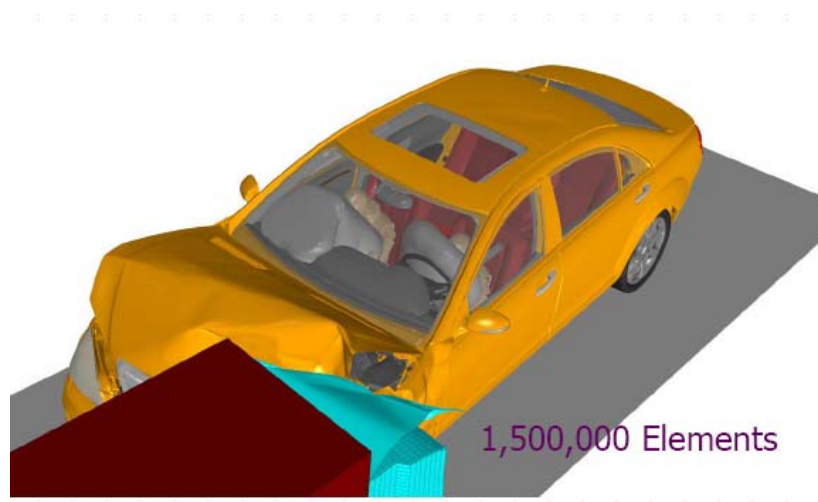
---

velocidad de procesado variaba desde 36 minutos cada millón de ciclos con elementos sólidos de 4-8 nodos a 180 minutos por cada millón de ciclos con elementos de 16-20 nodos.

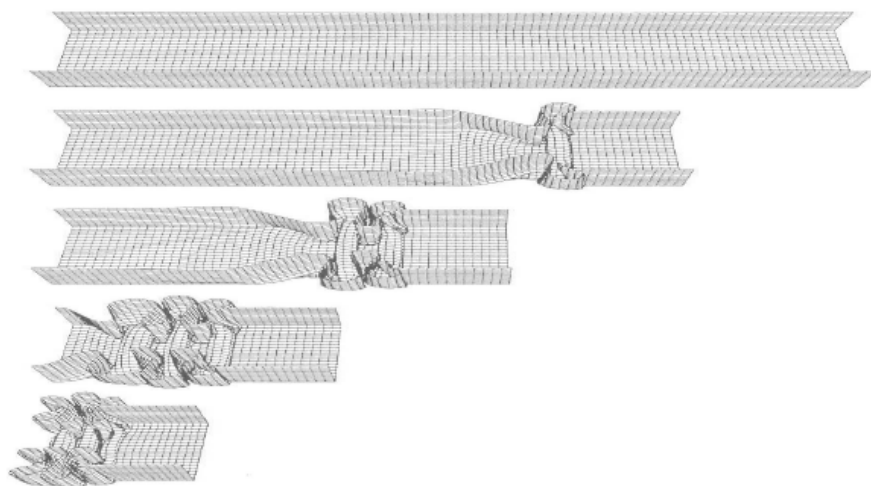
La siguiente versión del software es del año 1979 en el que DYNA3D fue totalmente renovado. Además hay que añadirle la implantación de CRAY, el súper ordenador que tomó relevo al CDC-7600 y con el que se consiguió un tiempo de tan solo 0.67 minutos por millón de ciclos.

En 1988 Hallquist, uno de los principales investigadores en el desarrollo de LS-DYNA, empezó a trabajar a media jornada en LLNL dedicando la mayor parte de su tiempo al desarrollo de las aplicaciones de la industria del automóvil. Los resultados de este periodo fueron satisfactorios y Hallquist renovó sus relaciones con LLNL para seguir trabajando en Livermore Software Technology Corporation a jornada completa [12] [13].

Una infinidad de progresos han tenido lugar hasta la fecha, en la que LS-DYNA ha demostrado que puede simular problemas dinámicos muy complejos de la realidad, con gran especialización en accidentes de automóviles. En la actualidad, se consiguen simulaciones de choques fieles a la realidad, la Figura 4-1 lo muestra. La Figura 4-2 muestra un simple ejemplo del citado algoritmo de contacto.



**Figura 4-1: Choque simulado con LS-DYNA**

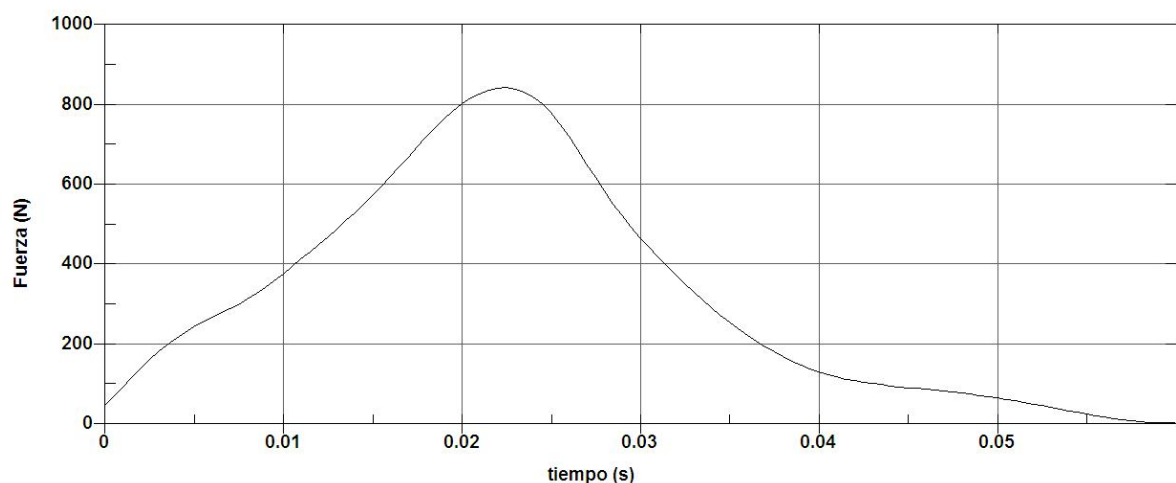


**Figura 4-2: Pliegue de chapa simulado con LS-DYNA**

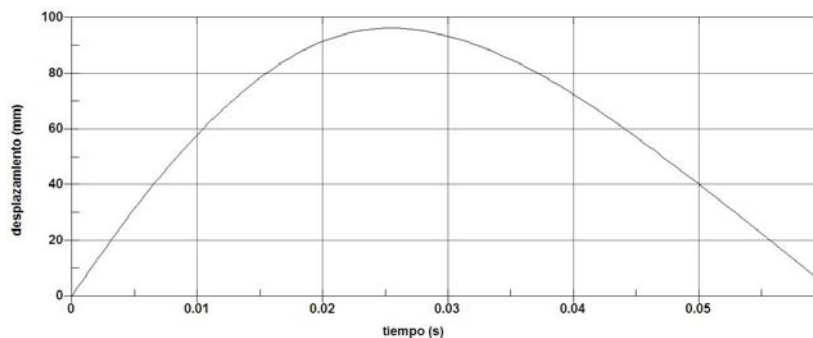
Livermore Software Technology Company permite descargar de su página web el pre y post- procesador diseñado expresamente para LS-DYNA, LS-Prepost, que es el que se utiliza en este proyecto. Al igual que LS-DYNA tiene muy buenas cualidades como procesador, LS-Prepost las tiene como pre y post procesador. De entre sus posibilidades cabe destacar que permite: hacer mallados regulares y editar elementos sin apenas esfuerzo,



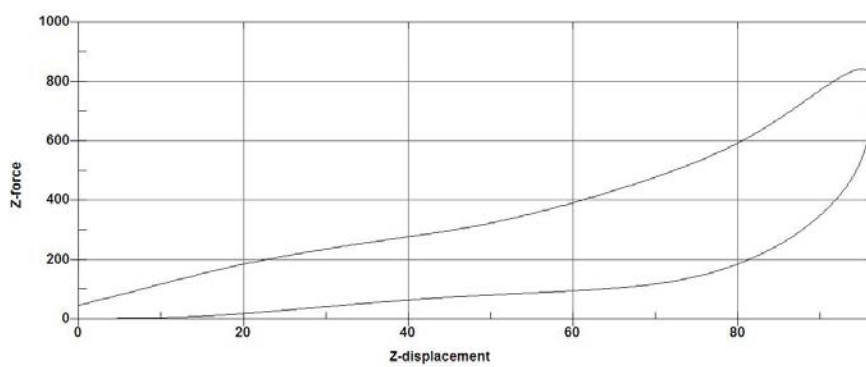
crear un cinturón de seguridad y ajustarlo perfectamente a la geometría del dummy, una vez creada la geometría básica de un airbag, plegarlo de varias maneras (enrollado, doblado), siempre pudiendo actuar en gran manera en la forma de llevar a cabo estas operaciones. Una vez llevado a cabo el procesado, permite visualizar gran cantidad de gráficas, editarlas, etc... por ejemplo, si se tiene la gráfica de fuerza frente a tiempo y la de desplazamiento frente a tiempo fácilmente se puede obtener la gráfica fuerza frente a desplazamiento. La Figura 4-3, Figura 4-4 y Figura 4-5 pertenecen al mismo problema, la Figura 4-3 y Figura 4-5 se obtuvieron directamente del problema y, gracias a una aplicación para trabajar con gráficas de LS-PrePost, se obtuvo fácilmente la Figura 4-5.



**Figura 4-3: Gráfica de fuerza frente a tiempo de LS-PrePost**

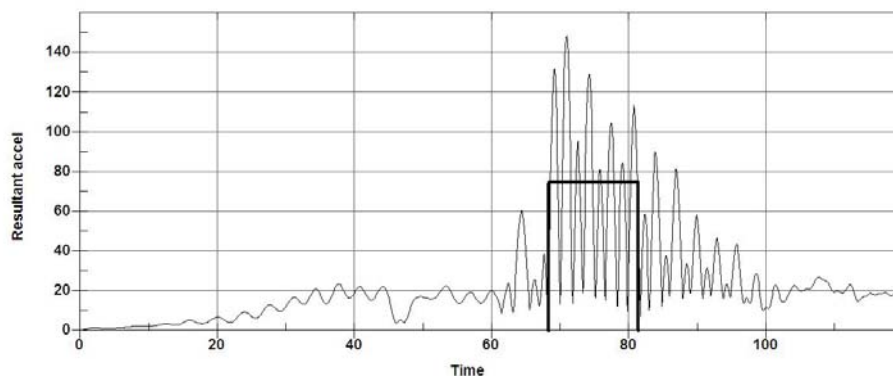


**Figura 4-4: Gráfica de desplazamiento frente a tiempo de LS-PrePost**



**Figura 4-5: Gráfica de fuerza frente a desplazamiento de LS-PrePost**

Cabe destacar alguna aplicación más específica del sector del automóvil con la que LS-PrePost permite obtener directamente parámetros como los criterios HIC-15, HIC-36 y el CSI para evaluar el nivel de daños en distintas partes del cuerpo.



**Figura 4-6: Obtención del HIC-15 con LS-Prepost**



---

## 5 MODELO DE SIMULACIÓN

---

El modelo de simulación de este proyecto representa un choque frontal de un ocupante en el interior de un vehículo. La simulación llevada a cabo es una basta simplificación de lo que en realidad ocurre cuando un vehículo colisiona frontalmente contra un muro, poste, otro vehículo o cualquier objeto que provoque su detención. Las partes que forman el modelo son el dummy, el vehículo, el cinturón de seguridad y en algunos casos el airbag. Se estudian tres casos distintos sobre el mismo modelo en los que se varían ligeramente ciertos elementos o propiedades, pero siempre manteniendo la condición de choque frontal, los principales componentes del vehículo y el cinturón de seguridad. A continuación se explican las principales características de cada caso.

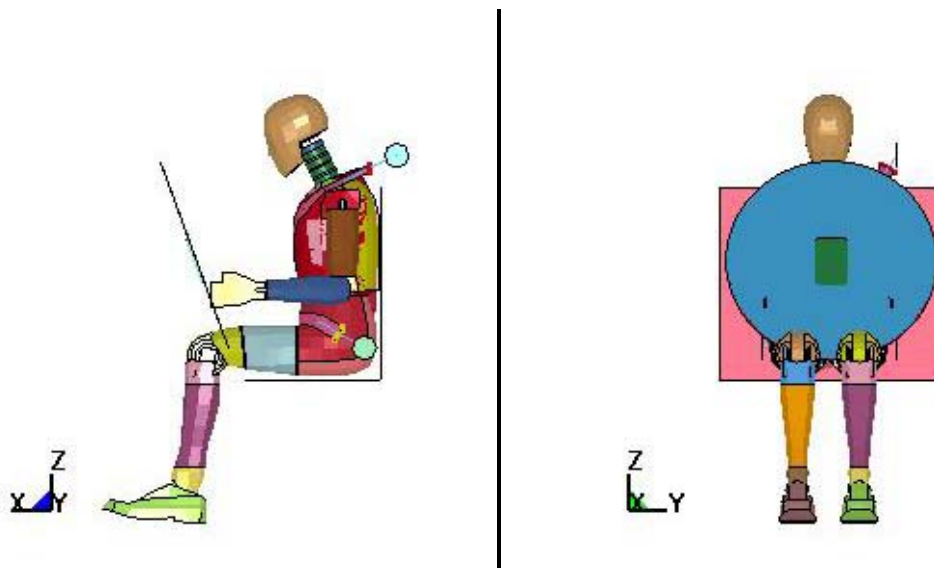
En el caso A el vehículo no posee airbag y tiene un cilindro macizo que representa cualquier parte dura del vehículo como puede ser el volante o el salpicadero (de aquí en adelante se hace referencia a esta parte como el salpicadero). En el caso B se mantienen las mismas propiedades que en el





caso A pero se elimina el salpicadero y se incorpora un airbag típico de conductor. En el caso C, se mantienen los mismos elementos que en el caso B pero se modifica una propiedad, el contacto entre el asiento y el dummy, el cual se hace diez veces más rígido. La Figura 5-1 muestra una vista general del caso B con la intención de definir el sistema de coordenadas del modelo, que es el mismo para los tres casos. La dirección de la marcha está definida por el eje X con el sentido positivo hacia delante y la vertical está definida por el eje Z con el sentido positivo hacia arriba.

Como ya se introduce en capítulos anteriores, para procesar la información y obtener los resultados se ha utilizado el procesador LS-DYNA y, tanto para introducir los datos en LS-DYNA como para interpretar los resultados obtenidos, se ha empleado el pre y post-procesador LS-PrePost, concebido específicamente para trabajar con LS-DYNA. Una característica de ambos programas y bastante común en los programas de elementos finitos es que no entienden de unidades, sólo de valores, por lo que el usuario ha de establecer las unidades para cada magnitud y que estas sean coherentes entre sí. La Tabla 5-1 muestra las unidades empleadas en este modelo.



**Figura 5-1: Sistema de coordenadas del modelo de simulación**



Magnitud	Unidad de medida
Masa	kg
Tiempo	ms
Longitud	mm
Temperatura	K
Cantidad de materia	mol
Fuerza	kN
Presión	GPa

**Tabla 5-1: Unidades del modelo de simulación**

## **5.1 EL DUMMY**

El modelo del dummy ha sido obtenido de la página oficial de LS-Prepost, del apartado de tutoriales [14]. Este modelo simula un dummy híbrido tipo III de percentil 50 que representa a un varón de 1,68 metros de altura y 77 kilogramos de peso. Los dummies híbridos tipo III son los más comunes en la evaluación de daños en ensayos de choques frontales. Los materiales de estos dummies son muy variados, incluyen goma, espuma, plástico, acero y aluminio para simular el comportamiento mecánico del cuerpo humano y poder medir el alcance de los daños ante una colisión. Las principales medidas que se obtienen de estos dummies y que en este proyecto se analizan en el capítulo de RESULTADOS (capítulo 6 ) son: la aceleración de la cabeza, la compresión del pecho y las cargas en el cuello y en el fémur. A partir de la valoración de los datos obtenidos, se evalúa el nivel de los daños producidos en el ocupante.

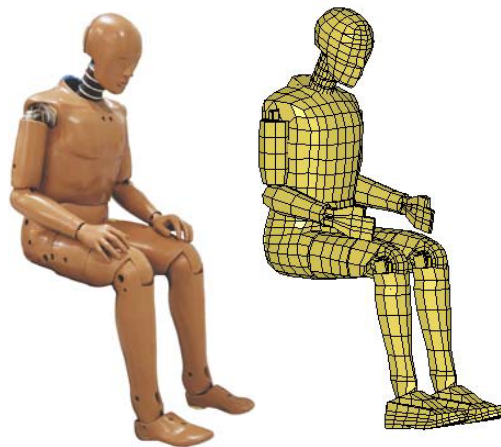


El dummy híbrido tipo III empleado en la simulación es un modelo de elementos finitos que representa al dummy real lo más fielmente posible. Está desarrollado expresamente para LS-DYNA y con él se pretende obtener precisión, eficiencia computacional, fiabilidad y facilidad de uso. Los principales aspectos tenidos en cuenta en su desarrollo son [17]:

- Tamaño de malla uniforme para todos los componentes deformables del dummy. Este tamaño ha sido optimizado para obtener tanto precisión en los resultados como velocidad computacional. La uniformidad en el tamaño hace que el modelo sea más fiable ya que el comando de contacto empleado para todos los componentes del dummy `*AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_CONTACT` está optimizado para mallados uniformes.
- Dotar de las verdaderas propiedades físicas al modelo sin bastas estimaciones y suposiciones. Esto no solo asegura una respuesta precisa, sino que incrementa la funcionalidad, ya que no se imponen limitaciones derivadas de estas estimaciones y suposiciones.

### **5.1.1 GEOMETRÍA**

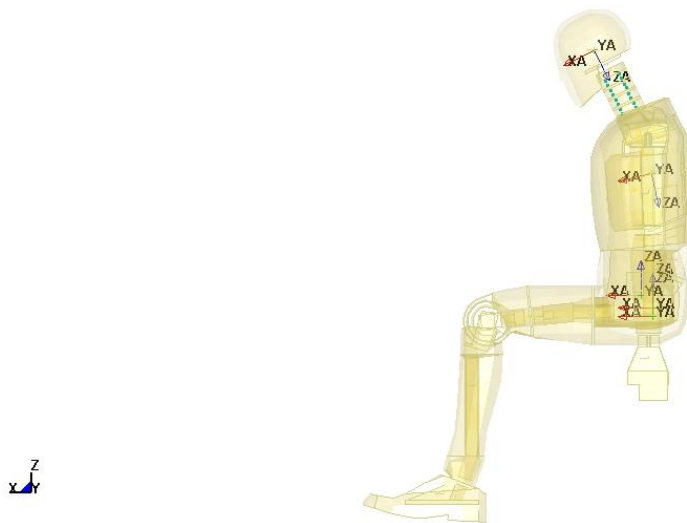
La geometría de un dummy es muy compleja y no es objeto de estudio de este proyecto por lo que no se entra en detalle de sus partes, simplemente se hace una comparación entre la imagen de uno real y el empleado en la simulación para apreciar su similitud. La Figura 5-2 muestra la geometría de un dummy híbrido tipo III real y del modelo de simulación.



**Figura 5-2: Dummy híbrido tipo III , real y modelo**

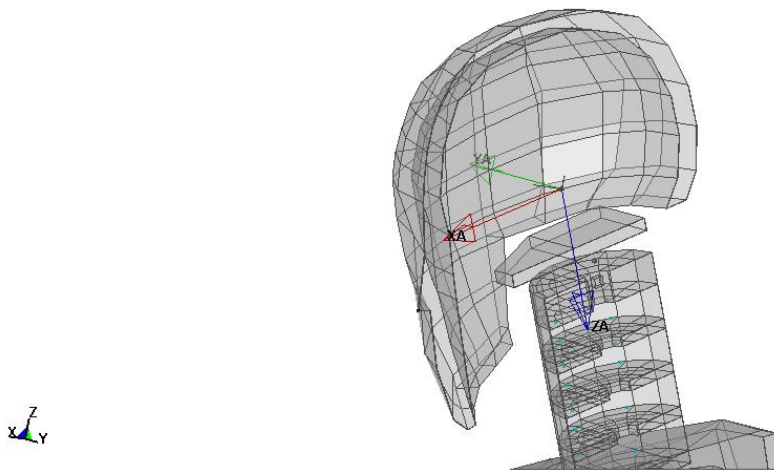
### **5.1.2 ACELERÓMETROS**

Un dummy real tiene instalados acelerómetros en puntos concretos de su geometría para medir las aceleraciones de distintas partes como la cabeza, el cuello, el pecho, la cadera, etc.... En el modelo son ciertas piezas las que cumplen la función de acelerómetros. En cada una de estas piezas hay que definir un sistema de coordenadas local caracterizado por los ejes  $X_A$ ,  $Y_A$ ,  $Z_A$  y su origen. La información que recogen se registra y almacena para luego, en el post-procesado, obtener la aceleración experimentada por estos acelerómetros virtuales en cada uno de sus ejes como una función del tiempo. En la Figura 5-3 se muestra una vista general de los acelerómetros instalados.



**Figura 5-3: Vista general de los acelerómetros**

En este proyecto el acelerómetro situado en la cabeza, más concretamente en el interior del cráneo, es objeto de estudio. Los datos obtenidos de este acelerómetro se analizan en el capítulo de RESULTADOS (capítulo 6). La aceleración que experimenta la cabeza es el parámetro que determina los daños en la masa cerebral. Con los valores registrados por este acelerómetro se establecen criterios que combinan el valor de aceleración alcanzado y su duración, ya que, como se explica a continuación, la duración de un valor determinado de aceleración es un dato muy importante. El cerebro es capaz de soportar valores grandes de aceleración en intervalos cortos de tiempo y no sufrir lesiones irreparables, por ejemplo 200 g's durante 2 milisegundos, pero no puede soportar valores que, aunque son más pequeños, perduran el suficiente tiempo como para provocar lesiones irreparables, por ejemplo, 80 g's durante 200 milisegundos. En la Figura 5-4 se muestra claramente la posición y la orientación de los ejes del acelerómetro situado en la cabeza.



**Figura 5-4: Acelerómetro de la cabeza**

## **5.2 EL VEHÍCULO**

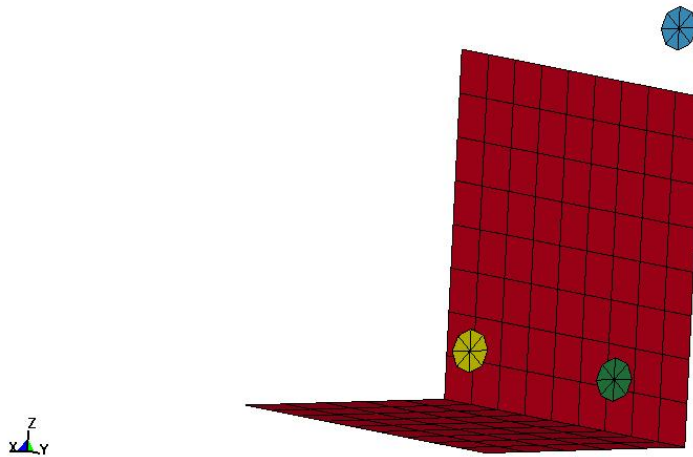
El modelo del vehículo se compone de un asiento y tres anclajes del cinturón de seguridad. Las cuatro partes que forman el vehículo no están unidas físicamente sino que se unen virtualmente con un comando propio del programa. Este comando une las distintas partes haciendo que se comporten como un único sólido rígido, evitándose el tener que crear la geometría completa, los contactos, etc...

### **5.2.1 GEOMETRÍA**

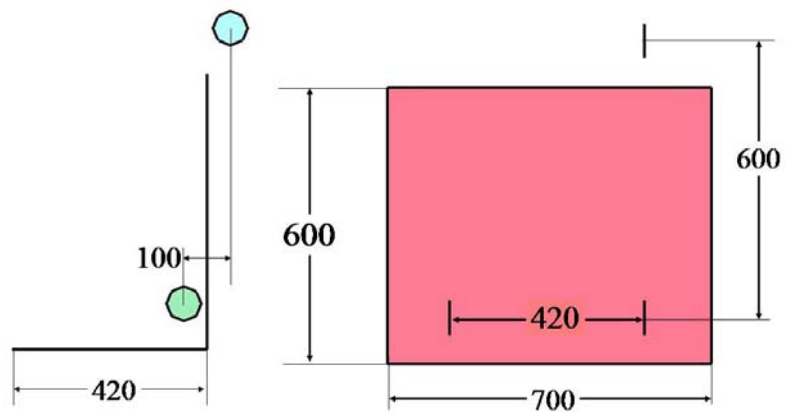
La geometría de las partes del vehículo es sencilla, se puede apreciar en la Figura 5-5. El asiento posee respaldo pero no reposacabezas y no se le ha conferido ningún tipo de forma ergonómica, además, no tiene ningún tipo de inclinación, es decir, que tiene el plano del respaldo paralelo al plano YZ y el plano del asiento paralelo al plano XY, según los ejes definidos al principio de este capítulo. Las cuatro partes que lo forman están modeladas



con elementos tipo placa por lo que hay que especificar su espesor. Los anclajes tienen un espesor de 4 milímetros y el asiento de 0,8 milímetros. La Figura 5-6 muestra las partes que forman el vehículo acotadas en milímetros.



**Figura 5-5: Vista general del vehículo**



**Figura 5-6: Asiento y anclajes acotados**



## 5.2.2 MATERIALES

La única función del vehículo simulado es la de soporte del dummy y del cinturón de seguridad, por lo que se ha supuesto un comportamiento de sólido rígido. El comando empleado en LS-DYNA para caracterizar el material, \*MAT\_RIGID, considera al cuerpo al que se le asigna como un sólido rígido pero, para caracterizar el contacto con otras partes se dota al material de módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson. El uso de este material supone un gran ahorro computacional y por tanto menor tiempo de procesado [12] [13]. El asiento es una parte definida como rígida en el problema que sí entra en contacto con otra, el dummy, pero que en vez de calcular las propiedades del contacto a partir del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson, las calcula con un comando específico para definir contactos entre sólidos rígidos, por lo que el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson son datos que no se utilizan pero que han de ser proporcionados coherentemente por necesidad interna del programa. Lo mismo ocurre con los anclajes del cinturón de seguridad, no entran en contacto con ninguna parte del problema pero hay que definir su módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson. La Tabla 5-2 muestra los valores de cada parámetro asignados a las distintas partes que forman el vehículo. La referencia para definir la posición de los anclajes del cinturón de seguridad es el dummy.

Parte	Módulo de elasticidad E (GPa)	Coeficiente de Poisson $\nu$	Densidad $\rho$ (kg/mm <sup>3</sup> )
Asiento	200	0.3	$7.84 \cdot 10^{-6}$
Anclaje 1 (izquierda-abajo)	200	0.3	$7.84 \cdot 10^{-6}$
Anclaje 2 (izquierda-arriba)	200	0.3	$7.84 \cdot 10^{-6}$
Anclaje 3 (derecha-abajo)	200	0.3	$7.84 \cdot 10^{-6}$

**Tabla 5-2: Parámetros de los materiales del modelo del vehículo**

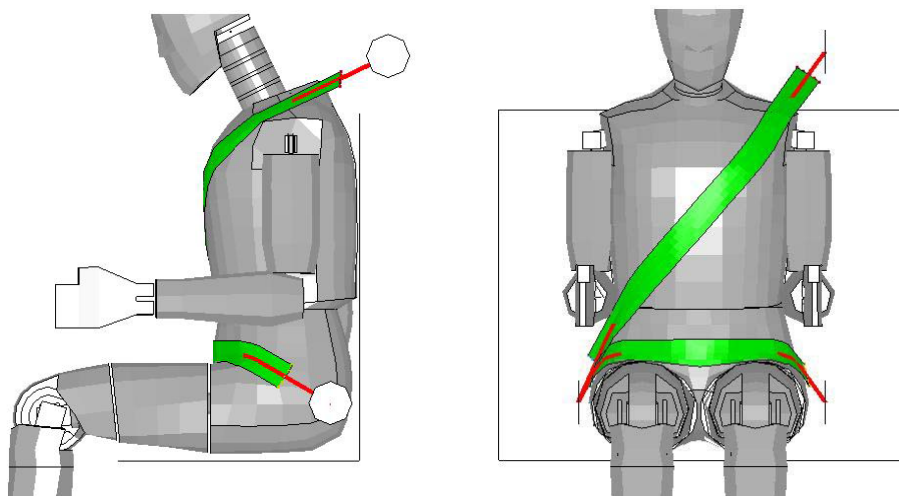


## 5.3 *EL CINTURÓN DE SEGURIDAD*

El modelo de simulación del cinturón de seguridad consta de dos partes bien diferenciadas, por un lado se encuentra la parte del cinturón que está en contacto con el dummy y por otro, la parte del cinturón que se une a los anclajes. LS-DYNA y LS-PrePost tienen aplicaciones específicas para modelar cinturones de seguridad. La ventaja de las aplicaciones específicas, en este caso de LS-PrePost, es la facilidad con la que se puede crear la geometría y ajustar su posición al igual que se ajusta al cuerpo un cinturón de seguridad real. Sin esta aplicación, definir la geometría correcta de un cinturón de seguridad y ajustarlo a la forma del dummy sería un proceso muy complicado y laborioso.

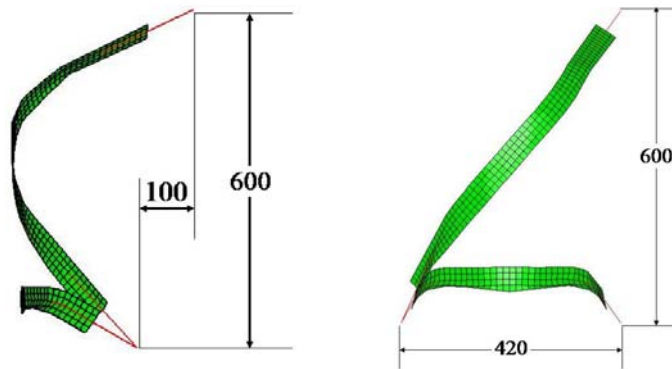
### 5.3.1 GEOMETRÍA

Las zonas que van conectadas a los anclajes están modeladas con elementos unidimensionales, en cambio las zonas que están en contacto con el dummy están modeladas mediante elementos bidimensionales. En la Figura 5-7 se pueden apreciar en rojo los elementos unidimensionales y en verde los elementos bidimensionales.



**Figura 5-7: Modelo del cinturón de seguridad**

La Figura 5-8 muestra la geometría del cinturón con los tres puntos de anclaje acotados en milímetros. También se muestra el mallado de los elementos bi-dimensionales, se puede apreciar que es continuo y regular.



**Figura 5-8: Cinturón de seguridad acotado**

La dimensión de los elementos bidimensionales no representada, es decir, el espesor, es de 2 milímetros. Los elementos unidimensionales empleados son elementos específicos para simular el comportamiento de un cinturón de seguridad denominados en el programa \*ELEMENT\_SEATBELT. No es necesario definir la geometría de estos elementos para caracterizar su comportamiento, simplemente hay que aportar sus funciones de carga y descarga que relacionan la fuerza axial resultante en el cinturón con la deformación ingenieril [12] [13].

### 5.3.2 MATERIALES

El material empleado en los elementos unidimensionales queda caracterizado por los siguientes parámetros:

- Densidad lineal. Se representa por la letra  $\lambda$ .

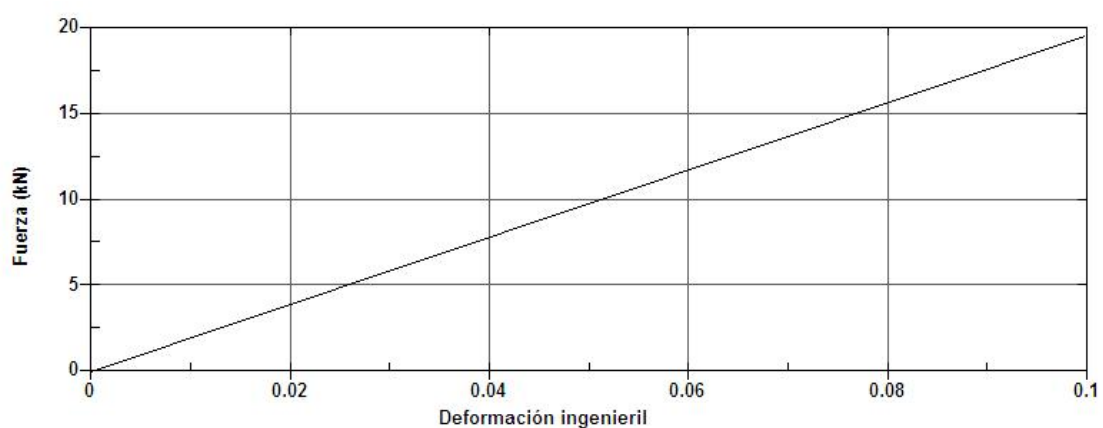


- Funciones de carga y descarga. Representan la fuerza axial en función de la deformación ingenieril.

En el modelo del proyecto la densidad lineal del cinturón de seguridad es de  $\lambda = 5.97 \cdot 10^{-4} \text{ kg/mm}$ . La Figura 5-9 muestra la función de carga del cinturón y la Figura 5-10 la de descarga.



**Figura 5-9: Función de carga del cinturón de seguridad**



**Figura 5-10: Función de descarga del cinturón de seguridad**



El material de los elementos bidimensionales es de comportamiento elasto-plástico, es decir, que la tensión es linealmente dependiente de la deformación hasta que ésta supera el límite elástico y por tanto el material entra en plasticidad. Cuando esto ocurre la tensión y la deformación dejan de ser linealmente proporcionales. Los parámetros que definen el comportamiento del material empleado en el modelo se encuentran en la Tabla 5-3.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Módulo de elasticidad	$E$	200	GPa
Coefficiente de Poisson	$\nu$	0.3	No tiene unidades
Densidad	$\rho$	$7.83 \cdot 10^{-6}$	$\frac{kg}{mm^3}$
Límite elástico	$\sigma_y$	0.15	GPa
Módulo de cortadura	$G$	2	GPa

**Tabla 5-3: Parámetros del material del cinturón de seguridad**

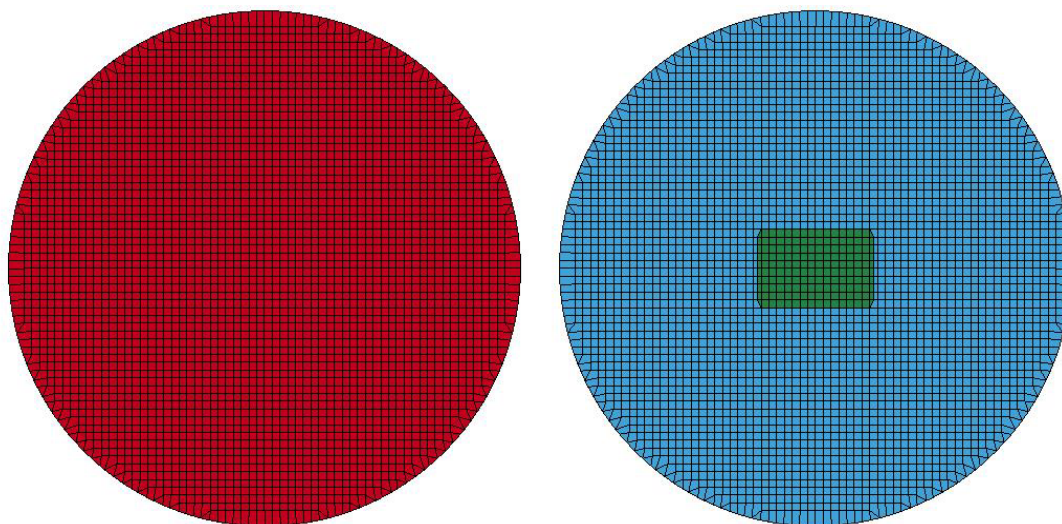
## **5.4 EL AIRBAG**

El modelo de simulación del airbag consiste en la bolsa de aire, el recipiente metálico y las ecuaciones termodinámicas que caracterizan el llenado. Gracias a aplicaciones específicas de LS-DYNA y LS-PrePost se puede simular el comportamiento de este sistema con gran eficiencia computacional y precisión en los resultados mediante un proceso sencillo, siendo en la realidad un problema complejo.



### 5.4.1 GEOMETRÍA

La Figura 5-11 y Figura 5-12 muestran las vistas superior, inferior y frontal del airbag con su correspondiente mallado.

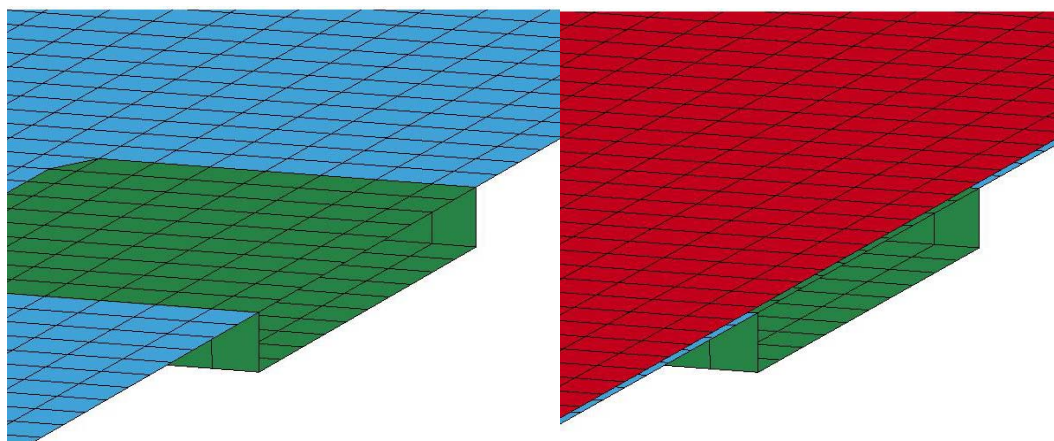


**Figura 5-11: Vistas superior e inferior del airbag**



**Figura 5-12: Vista frontal del airbag**

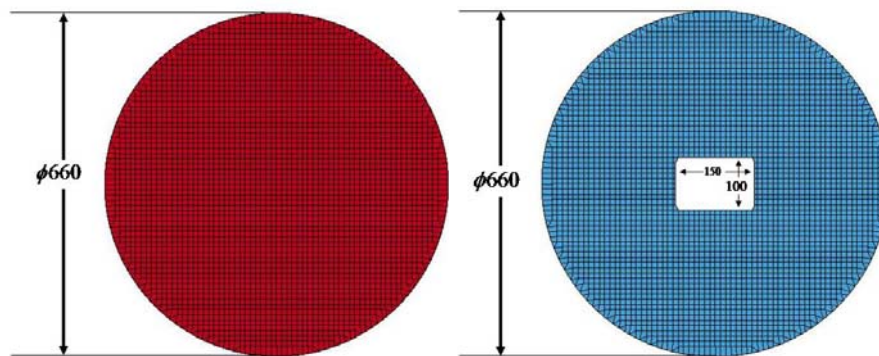
A continuación, para ver con más detalle la geometría del modelo, la Figura 5-13 muestran el airbag seccionado por un plano perpendicular que contiene la bolsa y que pasa por el punto medio de la misma. En la imagen izquierda de la Figura 5-13 se visualiza el airbag sin la parte superior de la bolsa para apreciar bien el recipiente metálico y la integración de los elementos. La imagen derecha de la Figura 5-13 muestra las dos capas, superior e inferior, que junto con el recipiente metálico forman el conjunto. La separación entre las capas superior e inferior de la bolsa es de 1 milímetro.



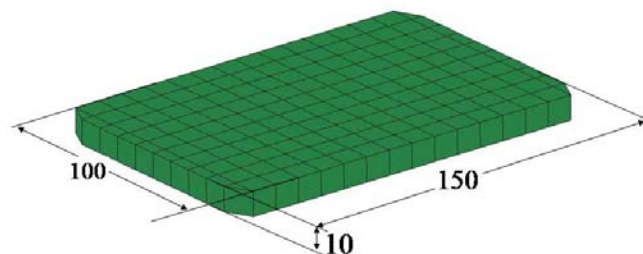
**Figura 5-13: Sección del airbag**

Las partes que componen el airbag se muestran acotadas en milímetros en la Figura 5-14 y Figura 5-15. Como estas partes están modeladas con elementos bi-dimensionales, a continuación se da una relación de las partes que forman el airbag añadiendo el espesor de cada una de ellas (se sigue el mismo orden en la Figura 5-14 y Figura 5-15).

- La parte superior de la bolsa (rojo), 0,38 milímetros de espesor.
- La parte inferior de la bolsa (azul), 0,38 milímetros de espesor.
- El recipiente metálico (verde), 2 milímetros de espesor.



**Figura 5-14: Partes superior e inferior de la bolsa acotadas**



**Figura 5-15: Recipiente metálico acotado**

## 5.4.2 MATERIALES

El material del recipiente metálico es acero. Como la deformación del recipiente metálico no es interés del proyecto se ha supuesto un comportamiento de sólido rígido. El recipiente metálico no entra en contacto con ninguna otra parte durante el proceso por lo que no sería necesario dotarle de módulo de elasticidad o coeficiente de Poisson, pero como se menciona anteriormente, por necesidades internas del programa hay que suministrarle datos coherentes, así que se dan los valores propios del acero. El material de la bolsa es tejido de nylon isotrópico y elástico. Los parámetros que definen el material de cada parte del airbag se muestran en la Tabla 5-4.





Parte	Módulo de elasticidad E (GPa)	Coeficiente de Poisson $\nu$	Densidad $\rho$ (kg/mm <sup>3</sup> )
Recipiente metálico	200	0.3	$7.84 \cdot 10^{-6}$
Bolsa	0.5	0.3	$8.7 \cdot 10^{-7}$

**Tabla 5-4: Tabla de propiedades de los materiales del airbag**

### 5.4.3 SIMULACIÓN DEL LLENADO

La hipótesis de llenado original es del año 1988 y pertenece a Wang y a Nefske, en cambio las recientes mejoras de 1992 se le atribuyen sólo a Wang [12]. En las hipótesis se considera como volumen de control al espacio contenido en una superficie cerrada establecida por el usuario. Si en alguna de las superficies que forman la frontera del volumen de control hay discontinuidades, LS-DYNA las obvia haciendo las suposiciones necesarias para conseguir un volumen de control definido por una superficie cerrada. En el caso estudiado se considera como volumen de control el espacio comprendido por ambas partes de la bolsa en cada instante, es decir, es un volumen de control con frontera variable [16].

Los balances de masa y energía efectuados en el volumen de control tienen en cuenta el flujo de salida de gas a través de los orificios de descarga y a través del propio tejido debido a su porosidad. Como se menciona en el párrafo anterior, LS-DYNA sólo entiende que una superficie cerrada puede ser la frontera de un volumen de control, por lo que tanto la porosidad del tejido como los orificios de descarga se definen mediante parámetros en el comando específico empleado para simular el llenado del airbag. La frontera se considera adiabática por lo que el intercambio de energía con el entorno se hace exclusivamente mediante los flujos entrantes y salientes. Hay que





proporcionar como dato la entrada de gases en el volumen de control mediante funciones dependientes del tiempo del flujo másico y de la temperatura de entrada del gas. Para estudiar el comportamiento de los gases en el interior del volumen de control el programa supone gases ideales caloríficamente perfectos. La hipótesis de gas ideal implica el cumplimiento de la siguiente ecuación:

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T$$

Siendo  $P$  la presión del gas,  $V$  el volumen que ocupa,  $m$  la masa,  $R$  la constante universal de los gases y  $T$  la temperatura, todo ello referido al interior del volumen de control. Tanto la presión como la temperatura se suponen uniformes en todos los puntos del interior del volumen de control. La hipótesis de gas ideal caloríficamente perfecto añade las dos ecuaciones siguientes en las que  $C_p$  es el calor específico a presión constante y  $C_v$  es el calor específico a volumen constante [16]:

$$C_p = cte$$

$$C_v = cte - R$$

Entrando ya en la implementación en LS-DYNA mediante LS-PrePost, para modelar el airbag se ha recurrido a la aplicación específica para ello, \*AIRBAG. De los comandos posibles se ha utilizado el comando \*AIRBAG\_HYBRID que considera que varios gases participan en el llenado de la bolsa. Estos gases son los que se encuentran en el volumen de control en el momento inicial, los gases de entrada y los gases de salida, pudiendo haber más de un gas en cada uno de ellos. La cantidad de gases en el momento inicial y la entrada de gases son definidas por el usuario pero la salida de gases es calculada a partir de las hipótesis y de los datos aportados que caracterizan el volumen de control, como el área de salida o el coeficiente de descarga. De cada uno de los gases que participan en el proceso hay que definir:

- Flujo másico de entrada como función del tiempo:  $\dot{m}(t)$



- Temperatura de entrada como función del tiempo:  $T(t)$
- Peso molecular del gas:  $M$
- Fracción molar del gas en el momento inicial:  $X_i$
- Calor específico a presión constante:  $C_p$

A parte de los datos propios de cada gas participante en el llenado, para caracterizar por completo el volumen de control (condiciones iniciales, de contorno y parámetros de salida) hay que aportar los siguientes datos:

- Volumen inicial:  $V_{ini}$
- Temperatura atmosférica:  $T_{atm}$
- Presión atmosférica:  $P_{atm}$
- Densidad del aire atmosférico:  $\rho_{atm}$
- Constante universal de los gases:  $R$
- Diferencia de presión entre el volumen de control y el entorno para la que comienza la salida de gases:  $\Delta P$
- Coeficiente de descarga de los orificios de salida:  $C_{23}$
- Área de descarga de los orificios de salida:  $A_{23}$
- Coeficiente de los orificios de pérdidas debidas a la porosidad del tejido:  $CP_{23}$
- Área de pérdidas debidas a la porosidad del tejido:  $AP_{23}$

Los cuatro últimos parámetros pueden ser aportados como valor constante o como función de la presión interior.

En la simulación llevada a cabo en este proyecto se ha considerado que la bolsa en el momento inicial contiene un volumen despreciable de aire

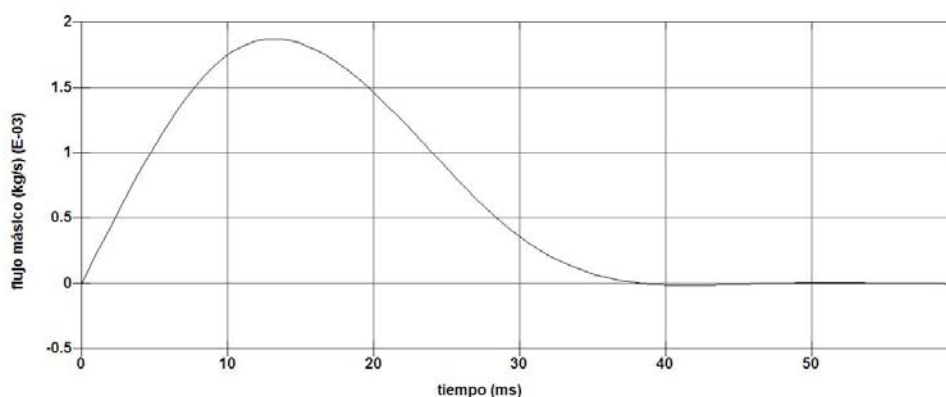


atmosférico y que se ha llenado con nitrógeno. Los parámetros que definen a los gases participantes en el llenado de la bolsa se muestran en la Tabla 5-5.

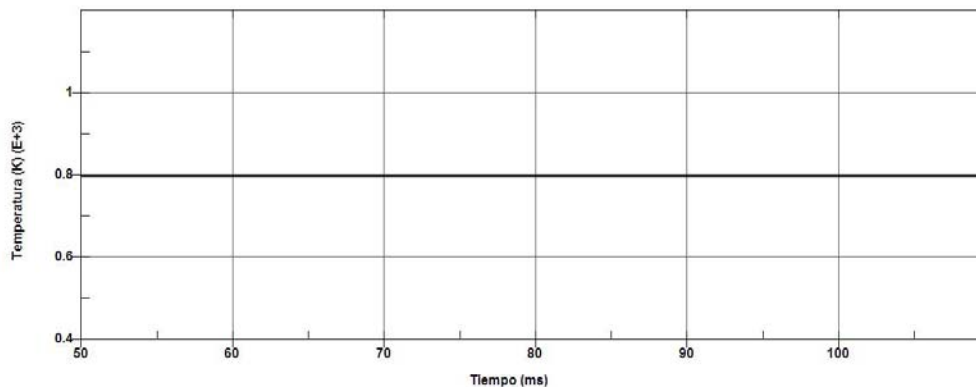
Gas	Peso molecular M (kg/mol)	Fracción molar (en $t = 0$ ms)	Calor específico a presión constante $C_p$ (J/mol K)
Aire	0.0288	1	29.94
Nitrógeno	0.0250	0	35.90

**Tabla 5-5: Tabla de propiedades de los gases participantes en el llenado del airbag**

Hay que definir el flujo másico y la temperatura de entrada de los gases que llenan la bolsa, en este caso sólo nitrógeno. La Figura 5-16 muestra la gráfica que define el flujo másico como función del tiempo y la Figura 5-17 la función que define la temperatura de entrada del gas en función del tiempo.



**Figura 5-16: Función de flujo másico de entrada del nitrógeno**



**Figura 5-17: Función de temperatura de entrada del nitrógeno**

Finalmente, los parámetros que definen las condiciones iniciales, de contorno y de salida de gases del volumen de control se encuentran ordenados en la Tabla 5-6.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Volumen inicial	$V_{ini}$	0	$\text{mm}^3$
Temperatura atmosférica	$T_{atm}$	298	K
Presión atmosférica	$P_{atm}$	$1.01 \cdot 10^{-4}$	GPa
Densidad atmosférica	$\rho_{atm}$	$1.29 \cdot 10^{-9}$	$\text{kg}/\text{mm}^3$
Constante universal de los gases	$R$	8.314	J/mol K
Diferencia de presión entre el volumen de control y el entorno	$\Delta P$	$1 \cdot 10^{-5}$	GPa
Coefficiente de descarga de los orificios de salida	$C_{23}$	1	No tiene unidades
Área de los orificios de salida	$A_{23}$	982	$\text{mm}^3$
Coefficiente de descarga de las pérdidas por la porosidad del tejido	$CP_{23}$	0	No tiene unidades
Área de pérdidas de la porosidad del tejido	$AP_{23}$	0	$\text{mm}^3$

**Tabla 5-6: Parámetros del volumen de control**



## **5.5 CONDICIONES DE CONTORNO**

Las condiciones de contorno son las relaciones que se establecen entre las partes que forman el problema para su posible resolución. Están incluidos dentro de las condiciones de contorno los contactos, la velocidad inicial y los desplazamientos, velocidades y aceleraciones impuestas.

Un choque frontal supone una fuerte aceleración en sentido contrario a la marcha que provoca pasar de ir a una determinada velocidad a detenerse, todo ello en un intervalo de tiempo que no alcanza ni un segundo de duración. Con el fin de simplificar la implementación se van a impedir los desplazamientos del vehículo y se va a imponer una aceleración al dummy semejante a la que tendría lugar en un choque frontal. Los efectos son semejantes, ya que las velocidades inicial y final no son las que producen los daños sino que es la aceleración que sufren los cuerpos la que provoca las lesiones. A continuación se detalla cada una de las condiciones de contorno que se establecen en el caso estudiado en el proyecto.

### **5.5.1 VELOCIDAD INICIAL**

La velocidad inicial de todas las partes es cero y como LS-DYNA toma este valor por defecto, no hay que especificarla.

### **5.5.2 GRAVEDAD**

Se ha caracterizado el efecto de la gravedad en el problema imponiéndole una aceleración en dirección vertical y sentido hacia abajo a todos los nodos del dummy mediante el comando \*LOAD\_BODY\_GENERALIZED. El valor de la aceleración se introduce como una función del tiempo, en este caso toma el valor constante de  $0.00981 \text{ mm/ms}^2$ .



### 5.5.3 ACELERACIÓN IMPUESTA

La aceleración impuesta que simula la condición de choque frontal se aplica a los nodos que forman el dummy. La aceleración tiene dirección longitudinal y sentido hacia delante (sentido positivo del eje X según los ejes definidos en el problema). Al igual que para definir la gravedad, se ha empleado el comando \*LOAD\_BODY\_GENERALIZED pero con la gráfica de aceleración frente a tiempo que muestra la Figura 5-18. Como no es objeto de este proyecto definir con precisión los valores de los parámetros, se ha establecido una aceleración constante durante la supuesta detención del vehículo. Se ha supuesto que la velocidad inicial es de  $54 \text{ km/h}$  y que el proceso de detención se lleva a cabo en 80 milisegundos, por tanto el valor de la aceleración es  $1,875 \cdot 10^{-4} \text{ mm/ms}^2$ .

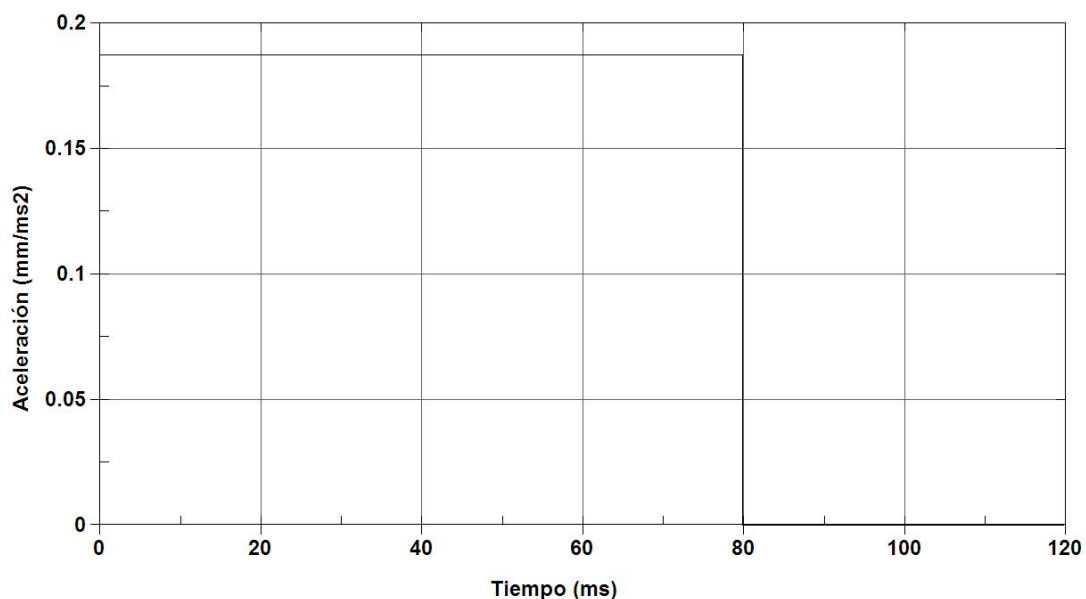


Figura 5-18: Función de aceleración impuesta



#### **5.5.4 VEHÍCULO: CONEXIÓN Y DESPLAZAMIENTOS**

Para mantener los componentes del vehículo rígidamente unidos se ha hecho uso del comando `*CONSTRAINED_RIGID_BODIES`, el cual une partes distintas aunque no sean continuas como si fueran un único sólido rígido. Para impedir que el vehículo se mueva arrastrado por el movimiento del dummy se han restringido los desplazamientos de los nodos del asiento mediante el comando `*BOUNDARY_SPC_NODE`. Al estar el resto de componentes del vehículo rígidamente unidos a él también quedan restringidos sus desplazamientos.

Dependiendo del caso estudiado, el vehículo puede incorporar un salpicadero o un airbag además del asiento y los anclajes del cinturón. Tanto con el salpicadero como con el airbag se ha empleado el mismo comando que en el resto de componentes del vehículo para que queden unidos rígidamente. El caso del salpicadero es simple porque es un cilindro sólido, pero en el airbag hay más partes y algunas flexibles así que es únicamente el recipiente metálico el que se une rígidamente al resto del vehículo.

#### **5.5.5 CONTACTO: AIRBAG Y CINTURÓN**

El contacto entre el dummy con los diferentes sistemas de seguridad, airbag y cinturón de seguridad, está simulado como un contacto entre superficies sin permitir penetración a través de ellas. El comando empleado es `*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE`. En dirección tangencial al plano de contacto los esfuerzos resultantes son debidos al rozamiento entre partes quedando definidos los esfuerzos por los coeficientes de rozamiento estático y dinámico. A partir de estos dos coeficientes y la ecuación mostrada a continuación se puede obtener el coeficiente de rozamiento en



función de la velocidad relativa entre superficies en contacto y así, los esfuerzos tangenciales entre las partes [12] [13]:

$$\mu = \mu_d + (\mu_e - \mu_d)^{-c \cdot |v_{rel}|}$$

$$\mu_{estático} = 0,5$$

$$\mu_{dinámico} = 0,5$$

Donde  $c$  es una constante definida para cada tipo de contacto y  $v_{rel}$  la velocidad relativa de una superficie sobre la otra, es decir, la velocidad de cualquiera de las dos superficies que participan en el contacto considerando como observador la otra superficie. Por ser iguales el coeficiente de rozamiento estático y el dinámico el segundo término de la parte derecha de la ecuación es siempre cero, sea cual sea el valor de  $c$  y de  $v_{rel}$ , por lo que  $\mu = \mu_d = 0,5$ .

En dirección normal al contacto se producen reacciones debidas a la deformación de las partes. En las partes pertenecientes al dummy, como se menciona anteriormente al hablar del tipo de material \*MAT\_RIGID, la fuerza resultante se calcula a partir del módulo de elasticidad y el coeficiente de poisson introducidos en el material. Los esfuerzos que produce el airbag son debidos a la presión en el interior de la bolsa y los del cinturón de seguridad a la tensión producida en él.

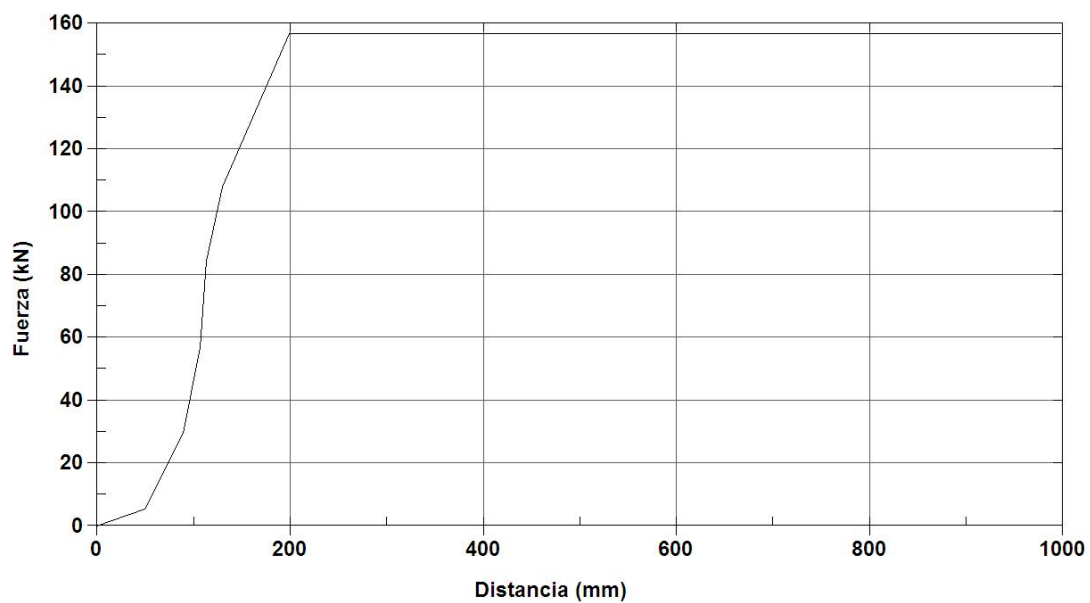
### 5.5.6 CONTACTO: ASIENTO

El contacto entre el asiento y las partes del dummy es ligeramente distinto a los contactos definidos anteriormente. El comando empleado esta vez es \*RIGID\_BODY\_ONE\_WAY\_TO\_RIGID\_BODY. Este comando calcula los esfuerzos tangenciales al plano del contacto a partir del rozamiento producido entre superficies y los esfuerzos normales gracias a una función aportada por el usuario que relaciona fuerza normal resultante (variable





dependiente) con distancia penetrada (variable independiente). La fuerza definida en la función aportada para definir el contacto es la resultante total aplicada en la superficie que ha atravesado cada uno de los cuerpos y en dirección normal a la misma y la distancia es la máxima penetración de cualquiera de los nodos. La función se muestra en la Figura 5-19.



**Figura 5-19: Función de fuerza frente a distancia**



---

## 6 RESULTADOS

---

En el ensayo de un choque frontal de un vehículo se recogen multitud de datos que, posteriormente, se valoran de acuerdo a unos criterios para establecer el alcance de las lesiones provocadas en los ocupantes. También se valoran los daños producidos en el propio vehículo que puedan tener consecuencias negativas en el desenlace final de un choque real, como por ejemplo, la no apertura de puertas tras el impacto. En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de cada uno de los casos planteados en el capítulo 5 .

Tras procesar los casos planteados, LS-DYNA genera archivos que contienen la información registrada a lo largo de la compilación. Es el usuario del programa el que establece qué datos se registran y con qué frecuencia lo hacen. Estos archivos contienen información de esfuerzos, deformaciones, velocidades, aceleraciones, presión, temperatura y un largo etc... Gracias a LS-PrePost se pueden visualizar los resultados obtenidos y trabajar con ellos en un entorno gráfico. En los apartados 6.2, 6.3 y 6.4 se muestran las secuencias de imágenes, las gráficas de esfuerzos y deformaciones y algún criterio específico para la evaluación de lesiones en ocupantes de vehículos obtenidos de los casos A, B y C respectivamente. Para la obtención de



resultados se ha utilizado como documento orientativo la directiva europea 96/79/CE [19] en la que, con carácter legal, se recogen criterios de evaluación de los datos obtenidos tras un ensayo de choque frontal de un vehículo motor. Se ha reservado el apartado 6.1 para introducir esta directiva.

## **6.1 DIRECTIVA 96/79/CE**

La directiva europea 96/79/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 1996 relativa a la protección de los ocupantes de los vehículos de motor en caso de colisión frontal establece criterios para los ensayos de choque frontal, en particular criterios biomecánicos, con el objeto de garantizar un elevado nivel de protección en caso de colisión frontal. El fin de la directiva 96/79/CE es reducir el número de víctimas en accidentes de carretera en Europa introduciendo medidas legislativas que mejoran, en la medida de lo posible, la protección de los ocupantes de los vehículos de motor en caso de colisión frontal. Es un documento que regula tanto las condiciones que han de darse en la ejecución del ensayo como los resultados que han de obtenerse a partir de él.

De entre todos los parámetros que se obtienen como resultados a partir de un ensayo de choque frontal, en este proyecto se da especial importancia al criterio con el que se evalúa el alcance de las lesiones provocadas en el cerebro, la norma de comportamiento de la cabeza, NCC, o más conocida por HIC (del inglés *Head Injury Criterion*). Este parámetro tiene en cuenta el valor de aceleración experimentado por la cabeza y la duración del mismo. Se define por la siguiente ecuación:

$$HIC = \max \left\{ (t_2 - t_1) \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\}$$

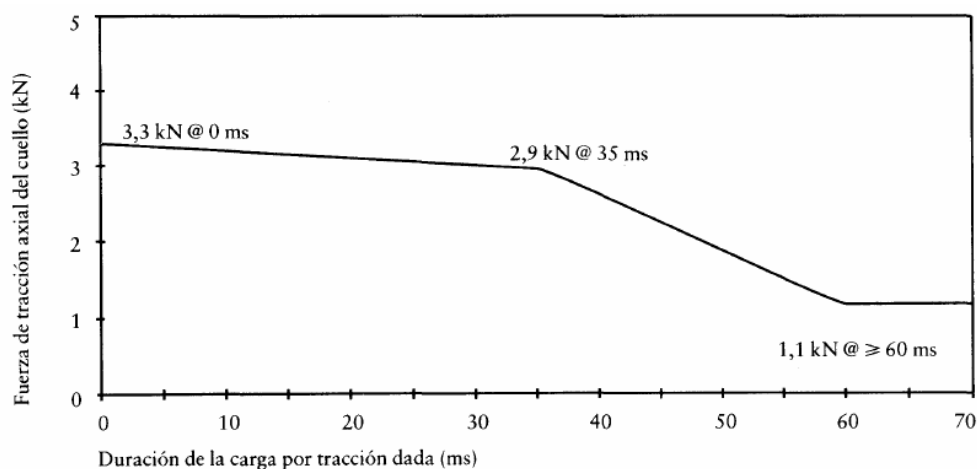


Donde  $a(t)$  es la aceleración de la cabeza expresada en unidades de gravedad y  $t_1$  y  $t_2$  son respectivamente los instantes de tiempo que determinan el comienzo y el final del contacto entre la cabeza y el elemento del vehículo con el que haya impactado como consecuencia del choque frontal expresados en milisegundos. Si  $t_1$  y  $t_2$  no son satisfactoriamente determinados, pasan a ser los dos instantes de tiempo que limitan el intervalo entre el principio y el final del registro cuyo valor de HIC es máximo [19]. Existen dos variantes del HIC, el HIC-15 y el HIC-36, que la directiva 96/79/CE no contempla. El valor numérico que los acompaña, 15 ó 36, define la máxima diferencia posible entre  $t_1$  y  $t_2$  expresada en milisegundos. El motivo de que la directiva 96/79/CE no contemple estas dos variantes es que la norma de referencia del comportamiento de la cabeza se considera válida si la cabeza no impacta contra ninguna parte dura del vehículo, que es cuando es necesario limitar la diferencia entre  $t_1$  y  $t_2$  y por tanto, entrarían en juego estas dos variantes, es decir, cuando la cabeza impacte contra una parte dura del vehículo, como el salpicadero, es indiferente que variante escoger ya que apenas transcurre en 1 milisegundo, pero cuando lo que detiene la cabeza es el airbag los instantes  $t_1$  y  $t_2$  no están claros y se limita su diferencia a 15 ó 36 milisegundos según la variante escogida. A continuación se van a detallar algunos de los requisitos cuyo cumplimiento se exige en la directiva 96/79/CE:

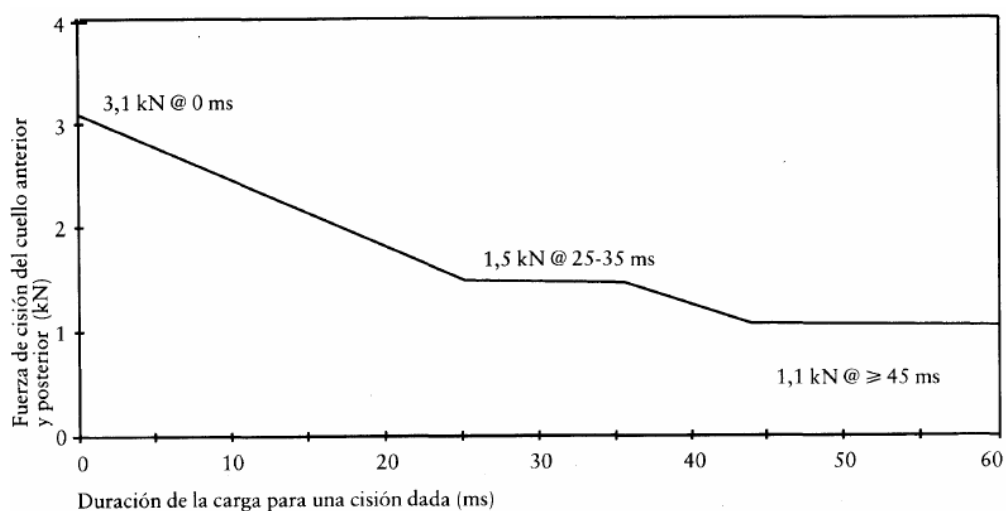
- La norma de referencia en el ensayo del comportamiento de la cabeza se considerará superada si la cabeza no impacta contra ninguna parte dura del vehículo. En caso de impactar, el HIC no será superior a 1000.
- La aceleración resultante en la cabeza no superará el valor de 80 g's durante más de 3 ms.
- La compresión del tórax no será mayor de 50 mm.
- La fuerza de tracción axial y la de cisión del cuello no superarán un determinado valor durante un tiempo establecido. Los valores

máximos con sus correspondientes tiempos de duración se muestran en la Figura 6-1 y Figura 6-2.

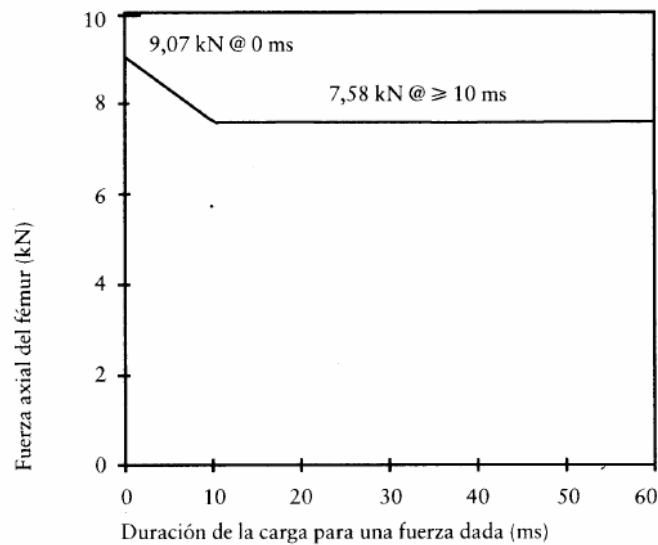
- El mismo concepto que se aplica para las fuerzas en el cuello se aplica en el fémur, siendo la Figura 6-3 la que relaciona los valores de carga y duración de la misma.



**Figura 6-1: Fuerza máxima de tracción del cuello frente a duración de la carga dada**



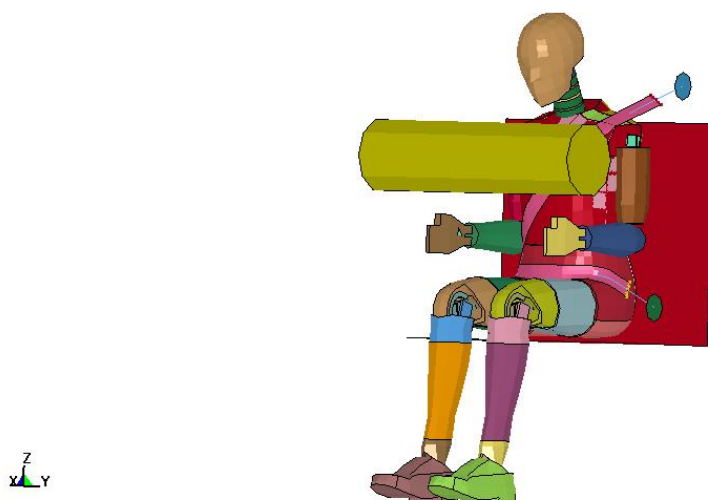
**Figura 6-2: Fuerza máxima de cisión del cuello frente a la duración de la carga dada**



**Figura 6-3: Fuerza del fémur frente a la duración de la carga dada**

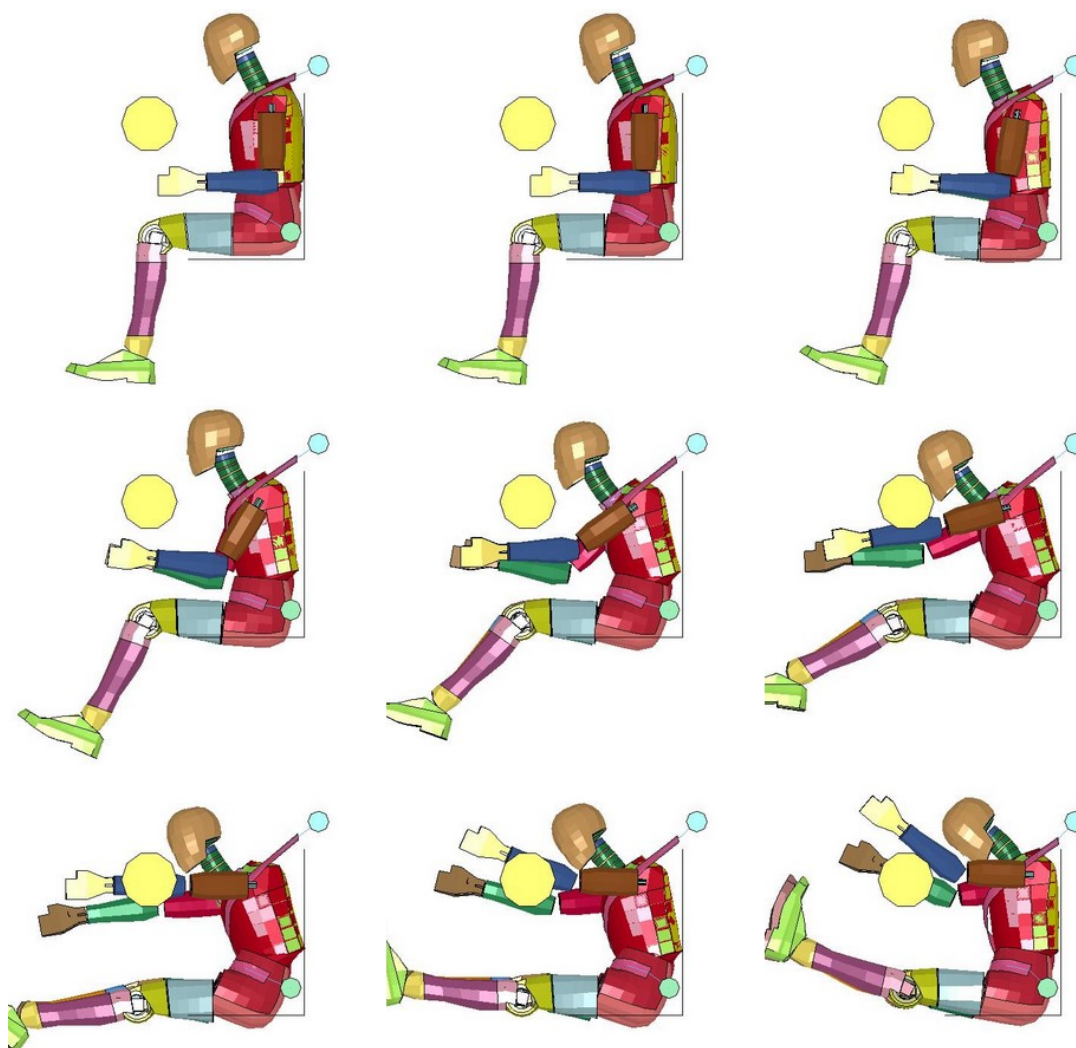
## ***6.2 CASO A: CHOQUE FRONTAL CON CINTURÓN DE SEGURIDAD, SIN AIRBAG Y CONDICIÓN DE CONTACTO I***

Como se menciona en apartados anteriores, el primer caso simula el choque frontal de un vehículo a 54 *km/h* dotado de cinturón de seguridad, pero no de airbag. Para simular las partes duras del vehículo, como pueden ser el volante o el salpicadero, se ha instalado en el modelo un cilindro macizo que la cabeza del dummy se puede encontrar en caso de choque frontal. La Figura 6-4 muestra una vista general del caso en el instante inicial.



**Figura 6-4: Vista general, caso A**

La secuencia de imágenes obtenida como resultado tiene una diferencia de 1 milisegundo entre una imagen y la siguiente. En la Figura 6-5 se muestran los instantes de tiempo 0 ms, 15 ms, 30 ms, 45 ms, 60 ms, 73 ms, 90 ms, 105 ms y 120 ms en orden cronológico de izquierda a derecha y de arriba abajo. Los instantes de tiempo, a excepción de la imagen perteneciente al instante  $t=73$  ms, han sido seleccionados arbitrariamente con la intención de mostrar la secuencia real del proceso. El instante  $t=73$  ms ha sido mostrado a conciencia porque es el instante en el que se produce el impacto entre la cara y la parte dura del vehículo. En capítulos anteriores se menciona la importancia de este suceso, el llamado segundo impacto, por las lesiones que conlleva.



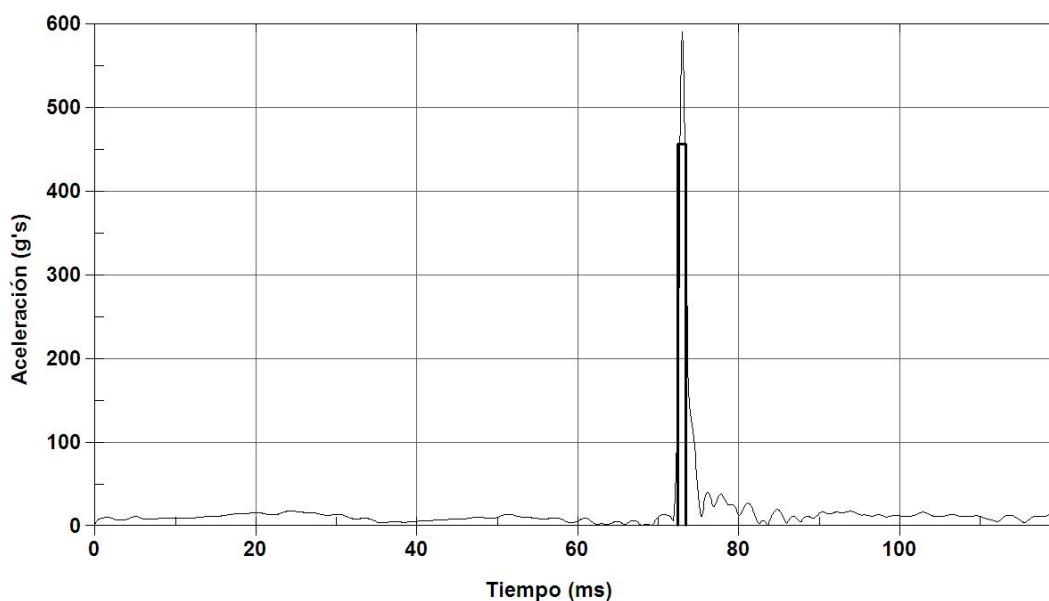
**Figura 6-5: Secuencia de imágenes, caso A**

A continuación se detallan los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros introducidos en el apartado 6.1.



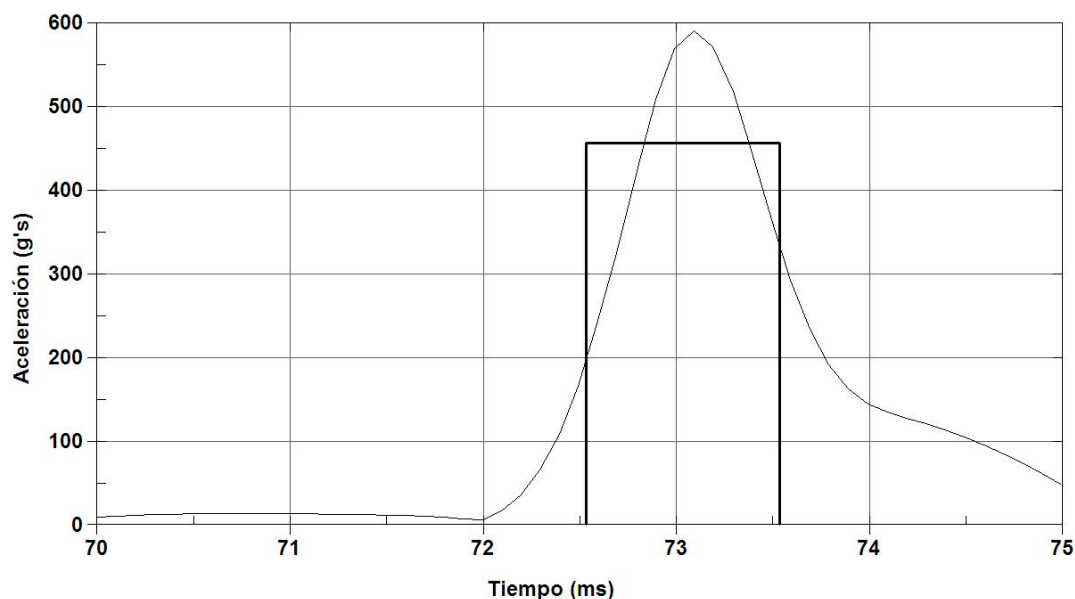
## 6.2.1 NORMA DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA

Como establece la directiva 96/79/CE se recoge el valor de la aceleración registrada en la cabeza a lo largo del suceso y posteriormente se calcula el HIC. La gráfica del HIC-36 superpuesta con la aceleración de la cabeza se muestra en la Figura 6-6. El valor obtenido del HIC es de 3577 con instante inicial de impacto  $t_1=72,54$  ms e instante final  $t_2=73,54$  ms. Este valor supera el máximo permitido por la directiva 96/79/CE. Se puede comprobar en la secuencia de imágenes que el instante en el que la cabeza impacta contra el salpicadero,  $t=73$  ms (Figura 6-5), está incluido en el intervalo de tiempo definido por  $t_1$  y  $t_2$ .



**Figura 6-6: HIC-36, caso A**

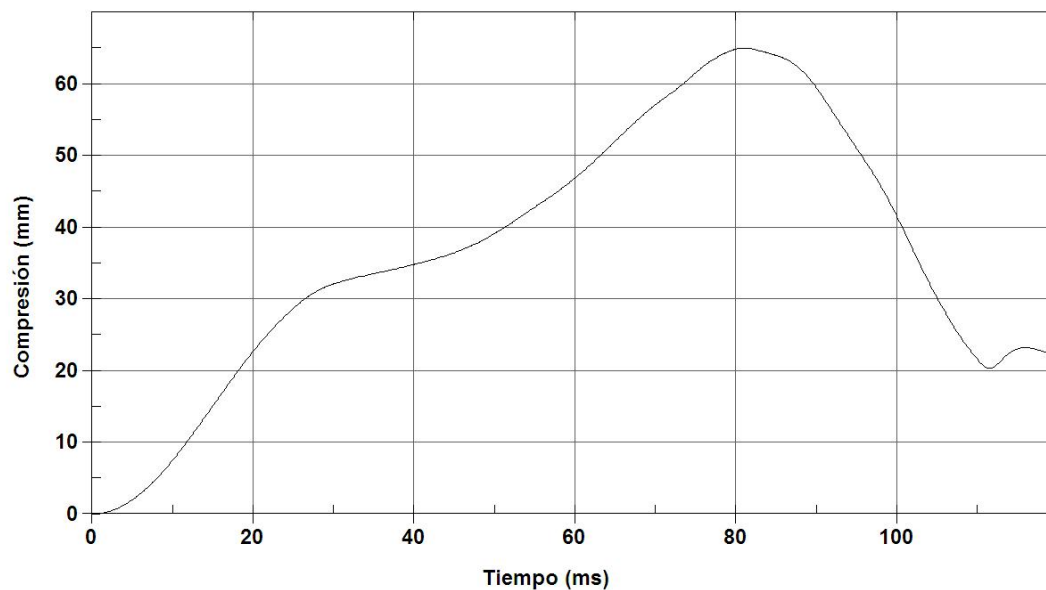
La Figura 6-7 muestra un escalado de la Figura 6-6 para apreciar bien el resultado obtenido.



**Figura 6-7: Escalado del HIC-36, caso A**

## **6.2.2 NORMA DE COMPRESIÓN DEL TÓRAX**

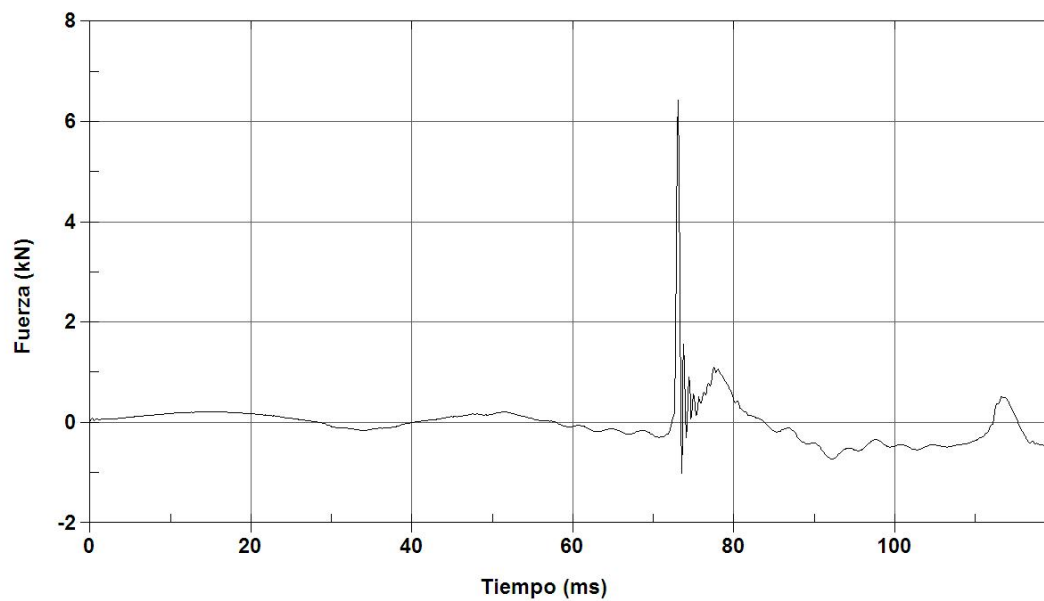
Como establece la directiva 96/79/CE se obtiene el valor de la compresión en el tórax a lo largo del suceso. La gráfica de la compresión en el tórax se muestra en la Figura 6-8. Se aprecia como el valor de la compresión aumenta hasta que alcanza su máximo, 65 mm en  $t=80$  ms, mientras existe aceleración debida al choque frontal. El motivo es que el cinturón de seguridad ejerce una presión localizada contraria a los efectos inerciales que se experimentan como consecuencia de un choque frontal. A partir del instante  $t=80$  ms la compresión comienza a disminuir porque la aceleración impuesta pasa a ser cero en la dirección de la marcha. El valor máximo registrado supera en 15 mm el permitido por la directiva 96/79/CE.



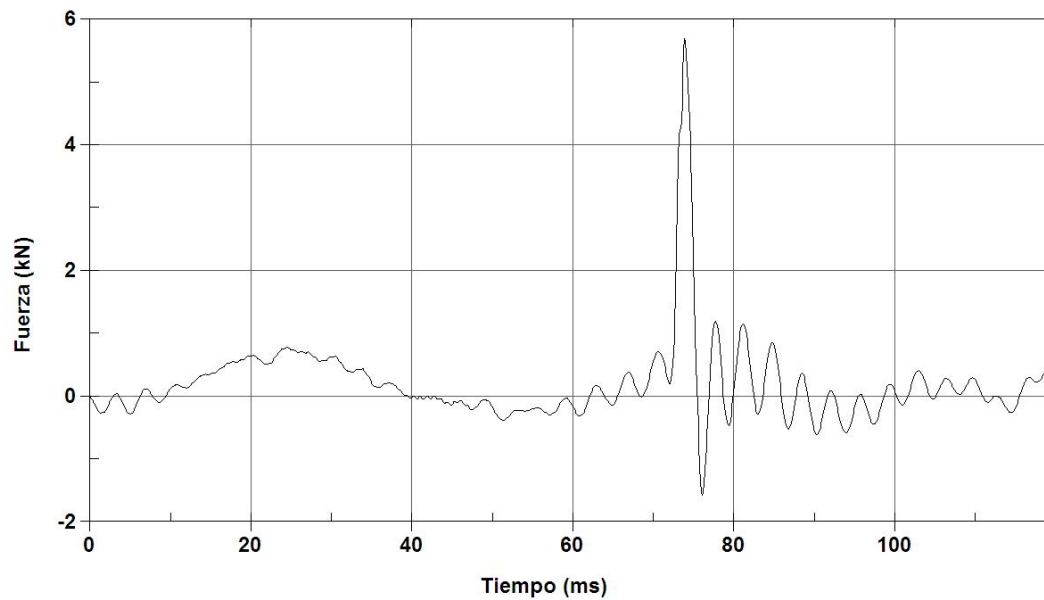
**Figura 6-8: Compresión en el tórax, caso A**

### **6.2.3 NORMA DE LESIÓN DEL CUELLO**

Como establece la directiva 96/79/CE se obtienen los esfuerzos de cisión y de tracción en el cuello a lo largo del suceso. Las gráficas de estos esfuerzos se muestran en la Figura 6-9 y Figura 6-10 respectivamente. Tanto los esfuerzos de cisión como los de tracción superan los permitidos por la directiva 96/79/CE en el instante del impacto entre la cara y el salpicadero ( $t=73$  ms).



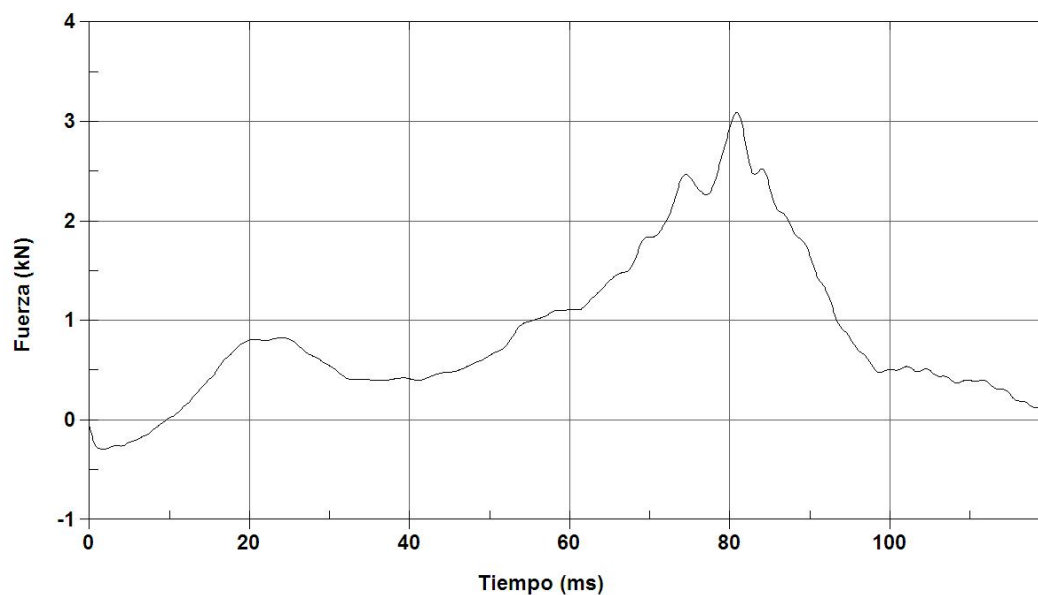
**Figura 6-9: Cisión en el cuello, caso A**



**Figura 6-10: Tracción en el cuello, caso A**

## 6.2.4 NORMA DE FUERZA DEL FÉMUR

Al tener cada ocupante dos fémures, se muestran dos gráficas, la Figura 6-11 corresponde al fémur de la pierna izquierda y la Figura 6-12 al fémur de la pierna derecha. Debido a la sencillez del modelo y la ausencia de elementos propios de un vehículo como la barra de la dirección o cualquier elemento que esté a la altura de las piernas del ocupante, no hay colisión entre los miembros inferiores y ninguna parte del vehículo. El valor máximo lo alcanza en  $t=80$  ms, a partir de este instante y debido a que ya no hay aceleración en la dirección de la marcha, su valor comienza a disminuir. Los valores máximos registrados en ambas piernas son del orden de la mitad del permitido por la directiva 96/79/CE.



**Figura 6-11: Esfuerzo en el fémur izquierdo, caso A**

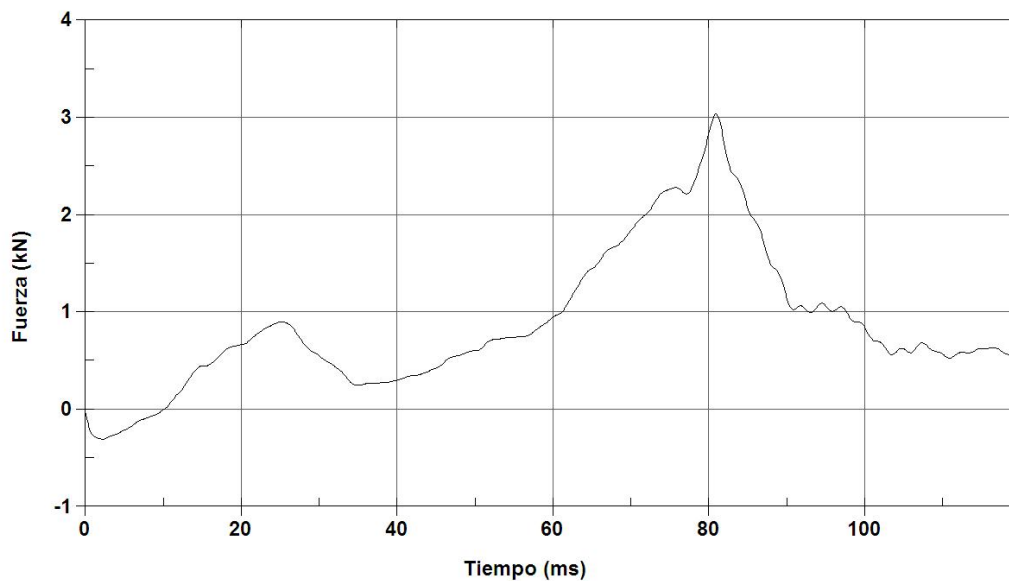
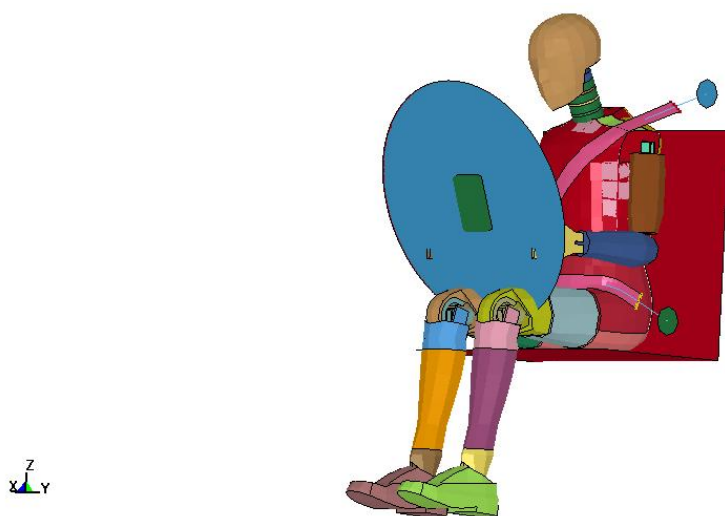


Figura 6-12: Esfuerzo en el fémur derecho, caso A

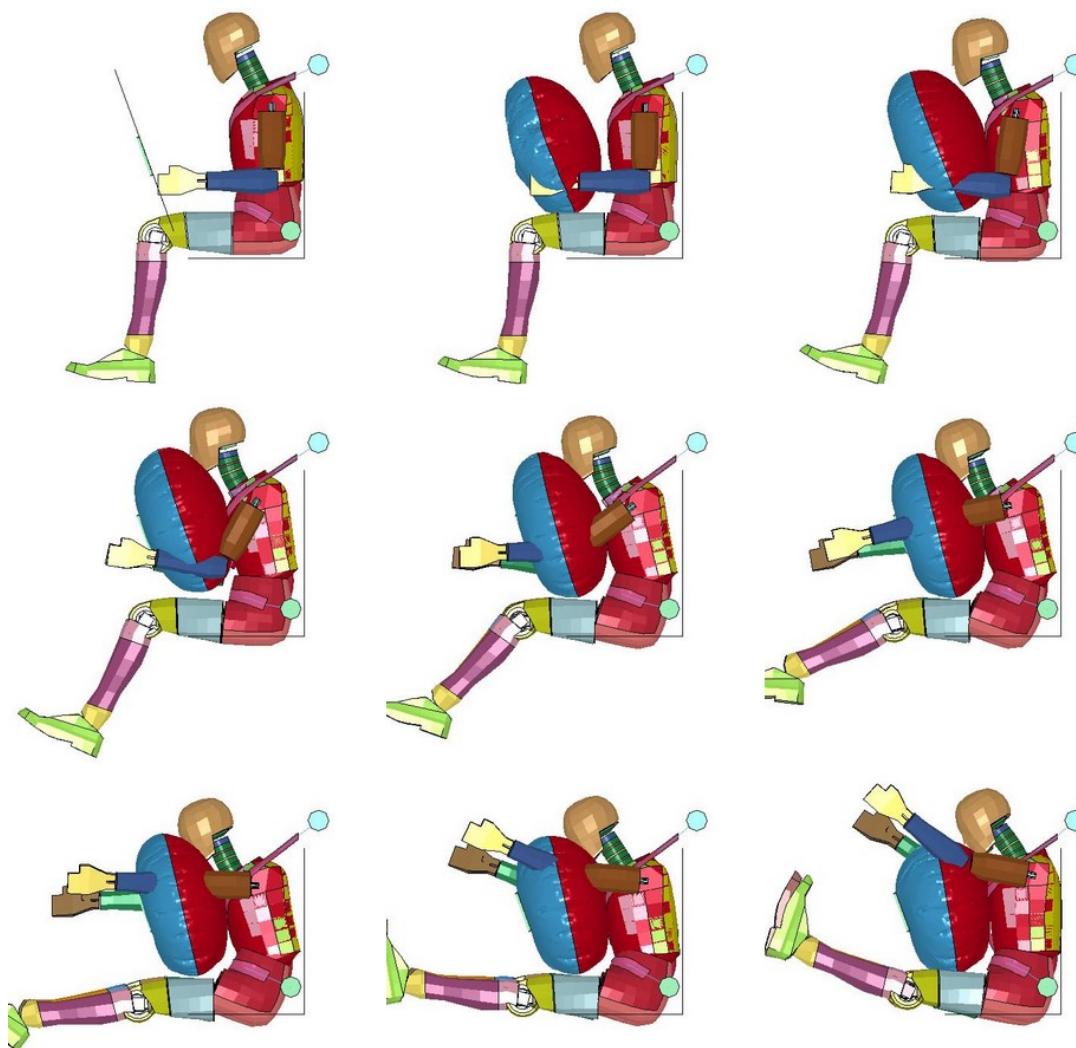
### ***6.3 CASO B: CHOQUE FRONTAL CON CINTURÓN DE SEGURIDAD, CON AIRBAG Y CONDICIÓN DE CONTACTO I***

Al igual que en el caso A, el choque simulado es el de un vehículo que circula a  $54 \text{ km/h}$  y que posee cinturón de seguridad, pero en este caso se incorpora un nuevo elemento de seguridad, el airbag (se elimina el salpicadero). Como se menciona en capítulos anteriores el airbag está rígidamente unido a las partes que forman el vehículo por su recipiente metálico. La Figura 6-13 muestra una vista general del caso B en el instante inicial.



**Figura 6-13: Vista general, caso B**

La secuencia de imágenes obtenida en este caso tiene una diferencia de un milisegundo entre una imagen y la siguiente. Los instantes de tiempo representados son 0 ms, 15 ms, 30 ms, 45 ms, 60 ms, 75 ms, 90 ms, 105 ms y 120 ms, escogidos arbitrariamente y mostrados en orden cronológico de izquierda a derecha y de arriba abajo en la Figura 6-14.



**Figura 6-14: Secuencia de imágenes, caso B**

A continuación se detallan los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros mencionados en el apartado 6.1.



### 6.3.1 NORMA DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA

Como establece la directiva 96/79/CE se recoge el valor de la aceleración registrada en la cabeza a lo largo del suceso y posteriormente se calcula el HIC. La gráfica del HIC-36 superpuesta con la aceleración de la cabeza se muestra en la Figura 6-15. El valor del HIC alcanza 201,4 y los instantes inicial y final son 19,88 ms y 55,85 ms. Se considera válido el resultado porque la cara no ha impactado con ninguna parte dura del vehículo pero, como el programa eso no lo sabe, intenta deducir los instantes inicial y final del supuesto impacto. El instante inicial,  $t_1=19,88$  ms, y el instante final,  $t_2=55,85$  ms, distan 36 ms por restricción de la variante del HIC escogida, HIC-36.

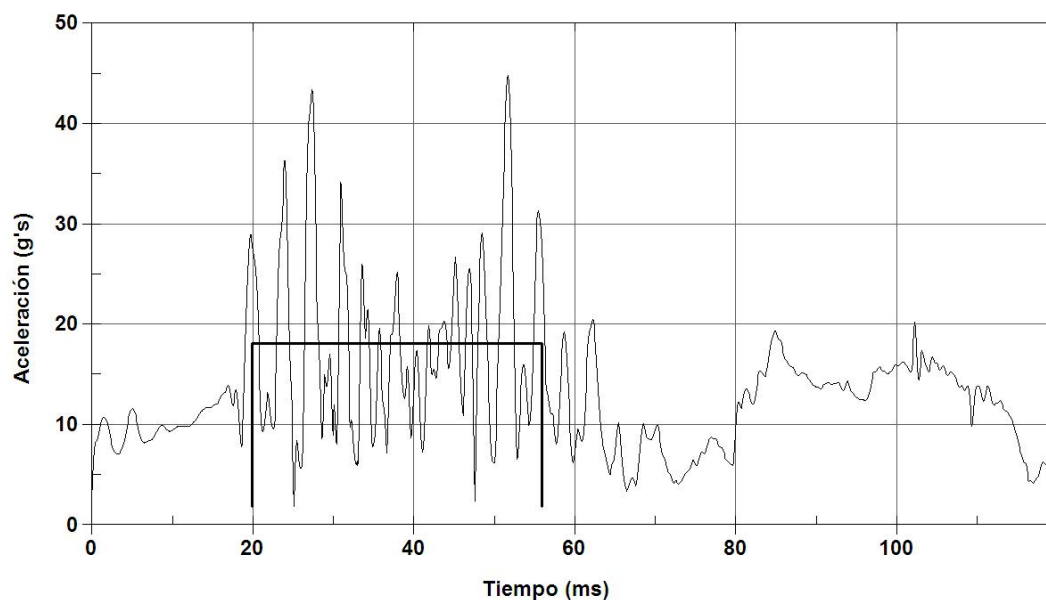
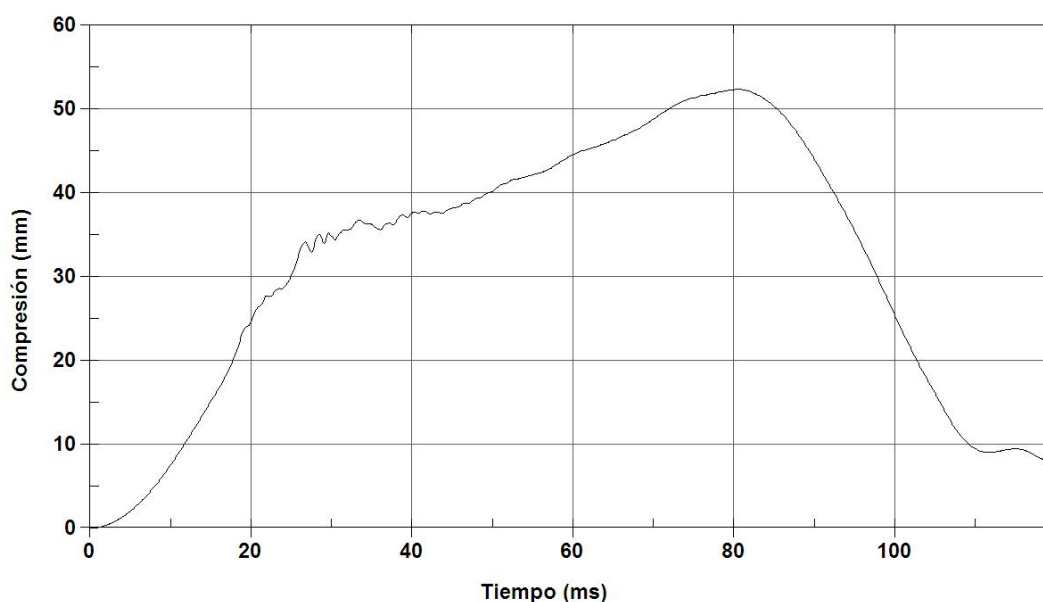


Figura 6-15: HIC-36, caso B

### 6.3.2 NORMA DE COMPRESIÓN DEL TÓRAX

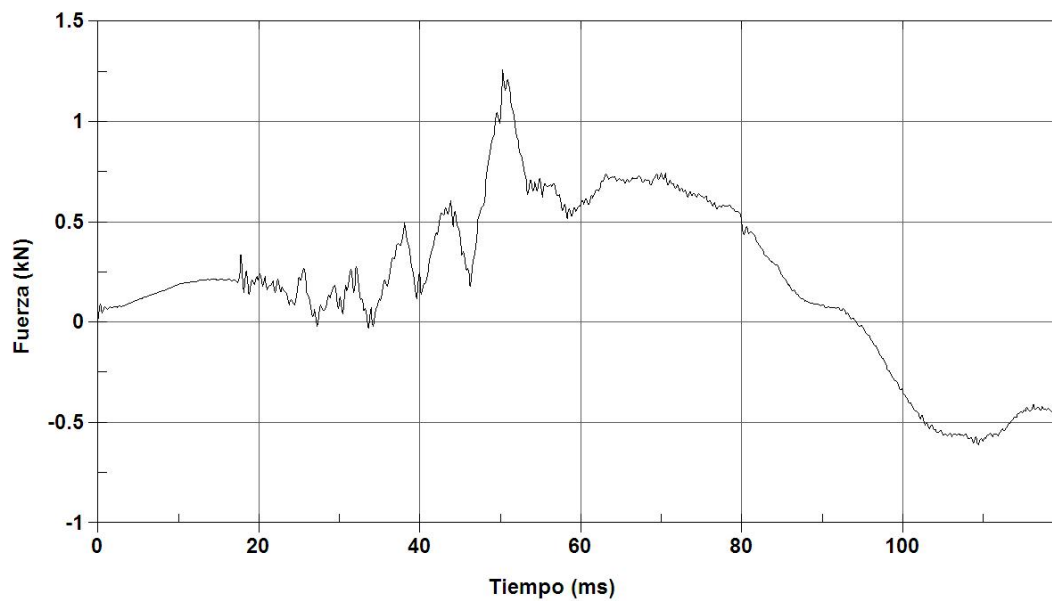
Como establece la directiva 96/79/CE se obtiene el valor de la compresión en el tórax a lo largo del suceso. La gráfica de la compresión en el tórax se muestra en la Figura 6-16. Las oscilaciones que se aprecian en los instantes iniciales se deben a la presión ejercida por el airbag. Exceptuando esto, evoluciona igual que en el caso A. En este caso tampoco se consigue estar por debajo del valor permitido por la directiva 96/79/CE.



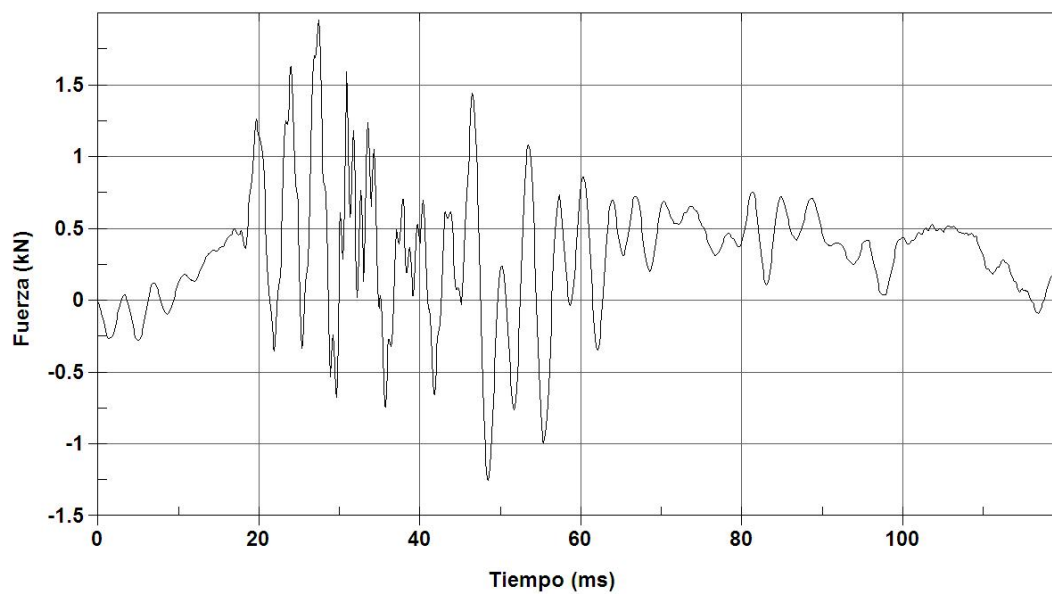
**Figura 6-16: Compresión en el tórax, caso B**

### 6.3.3 NORMA DE LESIÓN DEL CUELLO

Como establece la directiva 96/79/CE se obtienen los esfuerzos de cisión y de tracción en el cuello a lo largo del suceso. Las gráficas de estos esfuerzos se muestran en las Figura 6-17 y Figura 6-18 respectivamente. Debido al efecto colchón del airbag desaparecen los picos de esfuerzo que nos encontrábamos en el caso A en el instante de la colisión de la cabeza contra el salpicadero. En este caso ambos valores, el esfuerzo de tracción y de cisión, se sitúan por debajo del máximo permitido por la directiva 96/79/CE.



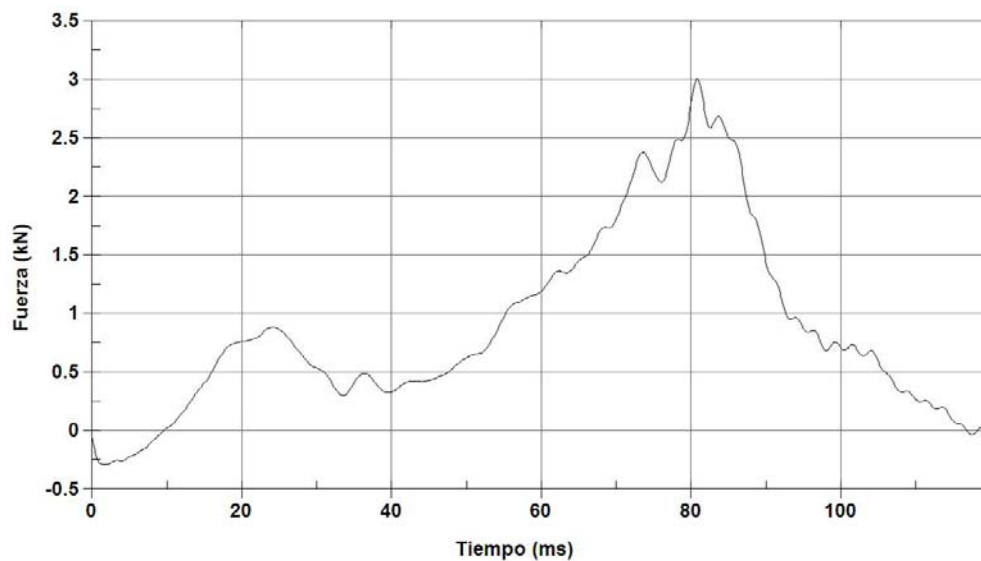
**Figura 6-17: Cisión en el cuello, caso B**



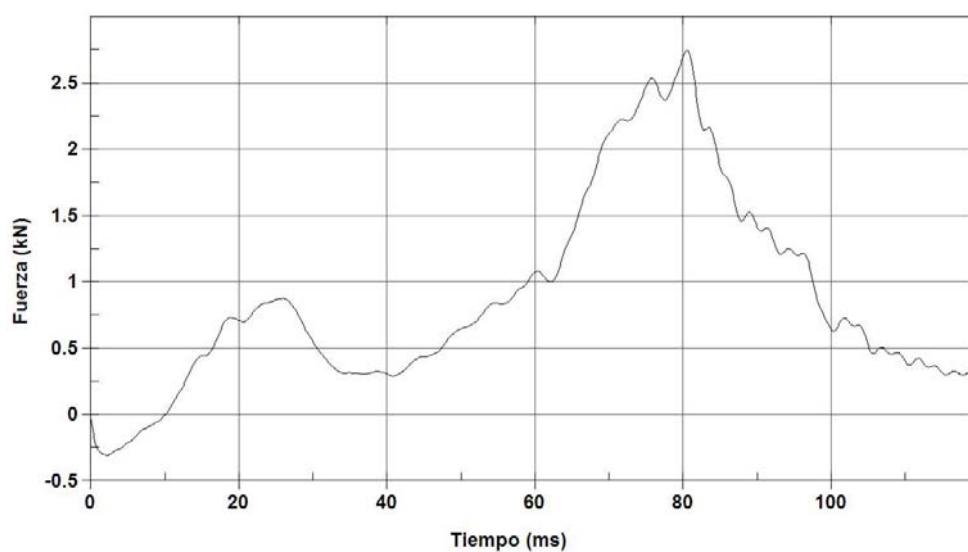
**Figura 6-18: Tracción en el cuello, caso B**

### 6.3.4 NORMA DE FUERZA DEL FÉMUR

Se muestran dos gráficas, la Figura 6-19 que corresponde al fémur de la pierna izquierda y la Figura 6-20 que corresponde al fémur de la pierna derecha. La evolución de los resultados es la misma que en el caso A.



**Figura 6-19: Esfuerzo en el fémur izquierdo, caso B**

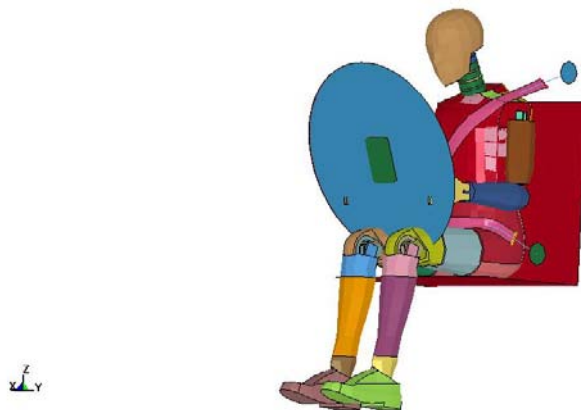


**Figura 6-20: Esfuerzo en el fémur derecho, caso B**



## **6.4 CASO C: CHOQUE FRONTAL CON CINTURÓN DE SEGURIDAD, AIRBAG Y CONDICIÓN DE CONTACTO II**

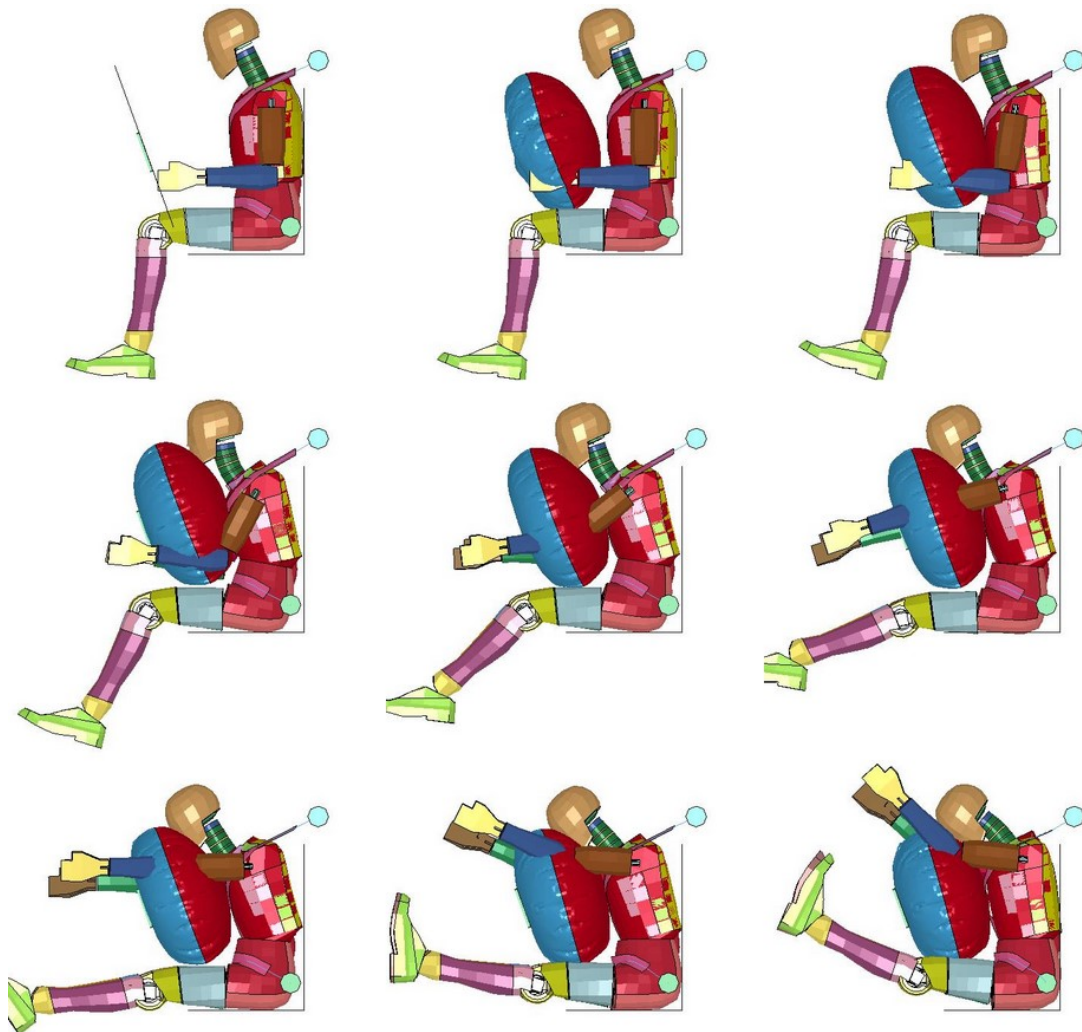
El caso C es muy parecido al anterior, el caso B. Posee los mismos elementos de seguridad y es también una simulación de un choque frontal de un vehículo a 54  $km/h$ . La diferencia radica en las propiedades del contacto entre el dummy y el asiento. Como se menciona en capítulos anteriores, el algoritmo empleado en este contacto relaciona penetración con fuerza resultante a partir de una función definida por el usuario. Para modificar el comportamiento de este contacto se ha escalado esta función con un factor de diez en los valores de las ordenadas, es decir, para un valor de penetración igual que en los casos anteriores, la fuerza resultante aplicada es diez veces mayor. Con este caso se intenta reflejar la importancia que tiene elegir correctamente los parámetros de la simulación. La Figura 6-21 muestra una vista general del caso C.



**Figura 6-21: Vista general, caso C**

La secuencia de imágenes obtenida en este caso tiene un milisegundo de diferencia entre una imagen y la siguiente. Los instantes de tiempo

representados son 0 ms, 15 ms, 30 ms, 45 ms, 60 ms, 75 ms, 90 ms, 105 ms y 120 ms, escogidos arbitrariamente y mostrados en orden cronológico de izquierda a derecha y de arriba abajo en la Figura 6-22.



**Figura 6-22: Secuencia de imágenes, caso C**

Las diferencias con el caso A son evidentes, en cambio, a simple vista el caso B parece igual. Si se observan con detenimiento las secuencias de imágenes, se puede apreciar que en el caso B la penetración del dummy en

el asiento es perceptible visualmente, mientras que en el caso C prácticamente es inapreciable. A continuación se van a detallar los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros mencionados en el apartado 6.1.

### 6.4.1 NORMA DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA

Como establece la directiva 96/79/CE se recoge el valor de la aceleración registrada en la cabeza a lo largo del suceso y posteriormente se calcula el HIC. La gráfica del HIC-36 superpuesta con la aceleración de la cabeza se muestra en la Figura 6-23. El valor de HIC alcanzado es de 195 y los instantes inicial y final  $t_1=16,79$  ms y  $t_2=52,76$  ms respectivamente. La evolución es la misma que en el caso B.

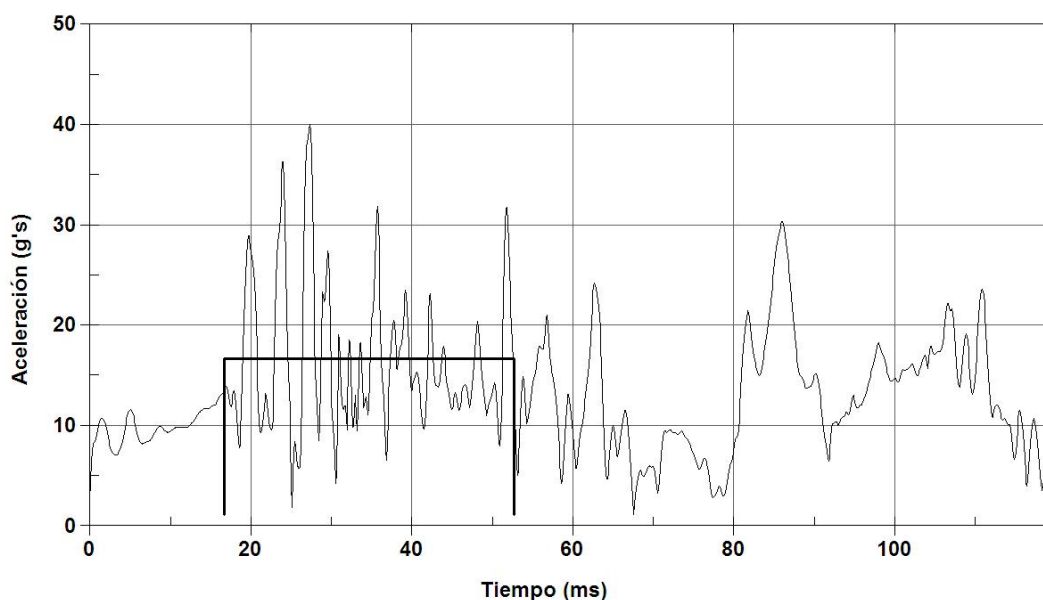
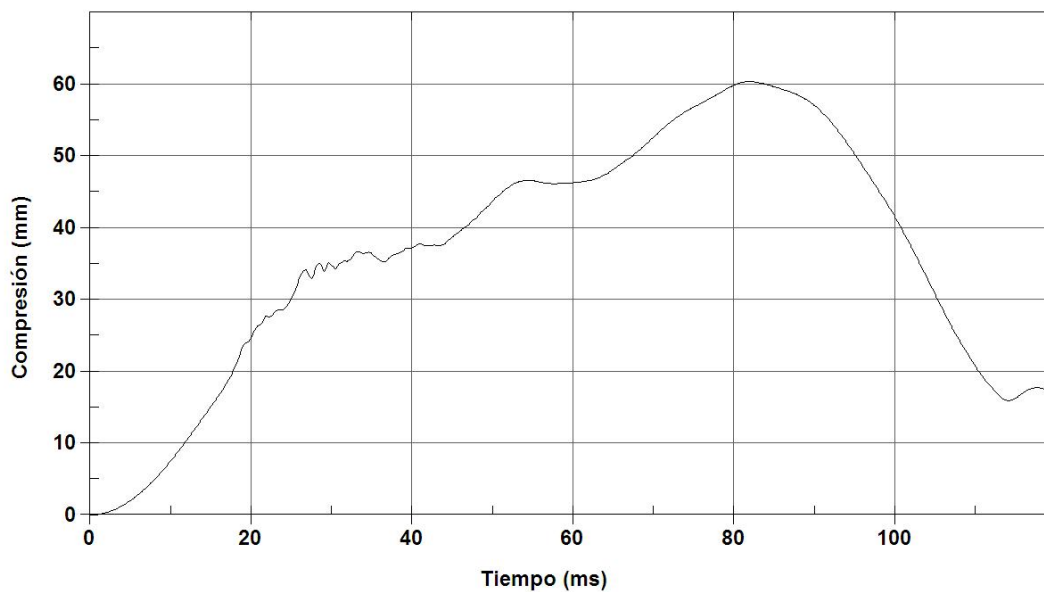


Figura 6-23: HIC-36, caso C

### 6.4.2 NORMA DE COMPRESIÓN DEL TÓRAX

Como establece la directiva 96/79/CE se obtiene el valor de la compresión en el tórax a lo largo del suceso. La gráfica de la compresión en el tórax se muestra en la Figura 6-24.

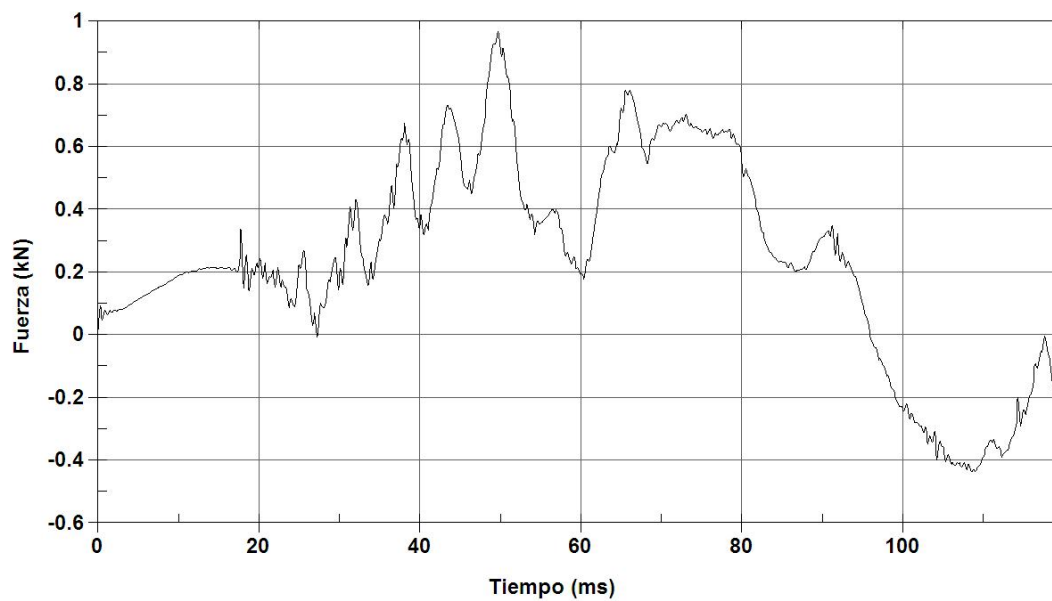


**Figura 6-24: Compresión en el tórax, caso C**

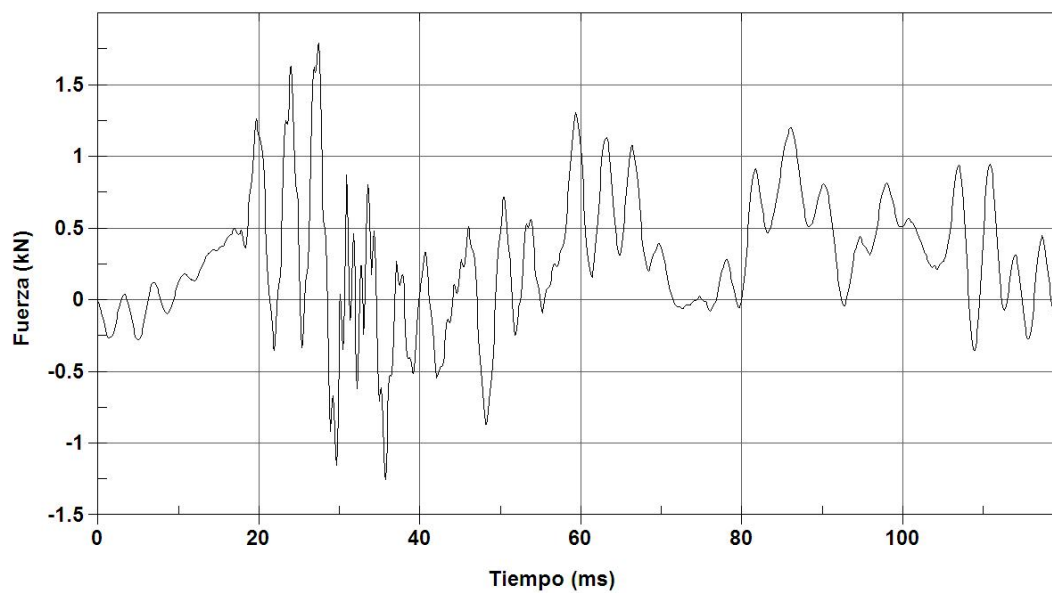
### 6.4.3 NORMA DE LESIÓN DEL CUELLO

Como establece la directiva 96/79/CE se obtienen los esfuerzos de cisión y de tracción en el cuello a lo largo del suceso. Las gráficas de estos esfuerzos se muestran en la Figura 6-25 y Figura 6-26 respectivamente. La evolución es la misma que en el caso B.





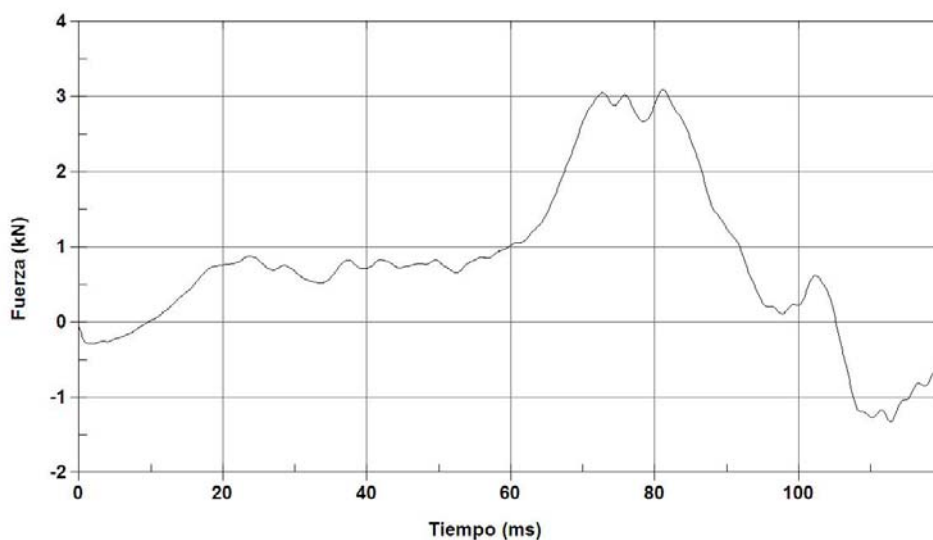
**Figura 6-25: Cisión en el cuello, caso C**



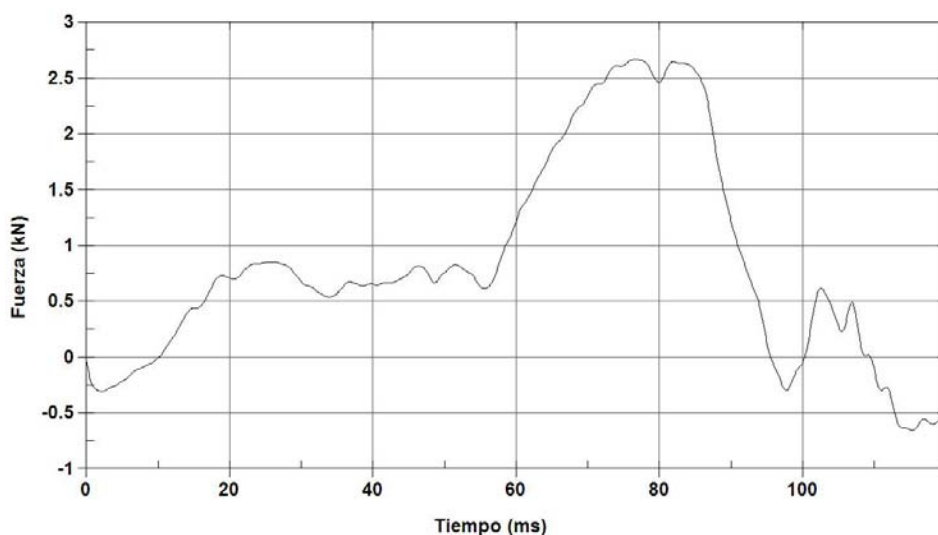
**Figura 6-26: Tracción en el cuello, caso C**

#### 6.4.4 NORMA DE FUERZA DEL FÉMUR

Se muestran dos gráficas, la Figura 6-27 corresponde al fémur de la pierna izquierda y la Figura 6-28 al fémur de la pierna derecha. La evolución es la misma que en los casos B y C.



**Figura 6-27: Esfuerzo en el fémur izquierdo, caso C**



**Figura 6-28: Esfuerzo en el fémur derecho, caso C**



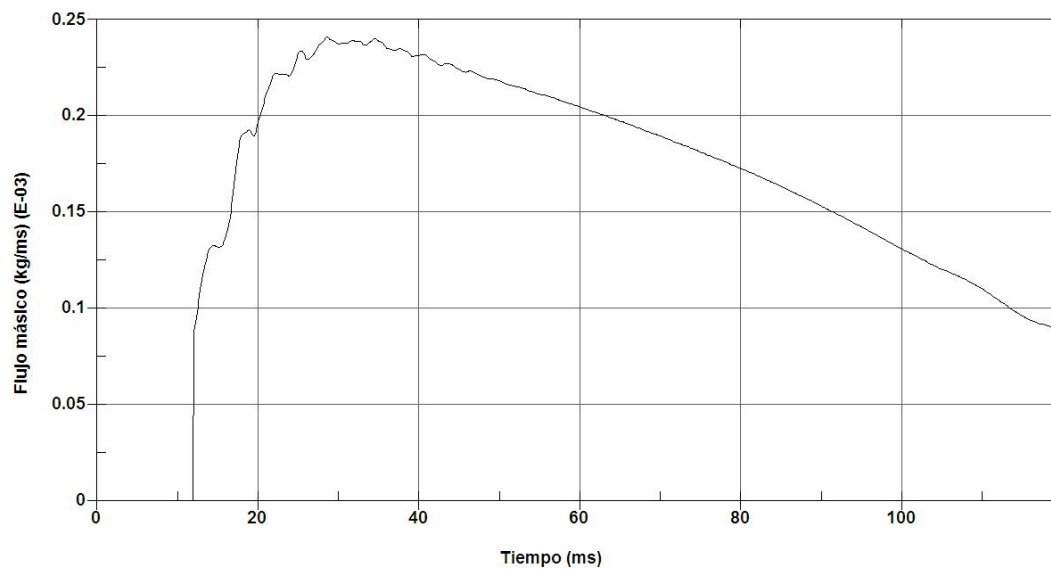
---

## **6.5 RESULTADOS TERMODINÁMICOS: EL AIRBAG COMO VOLUMEN DE CONTROL**

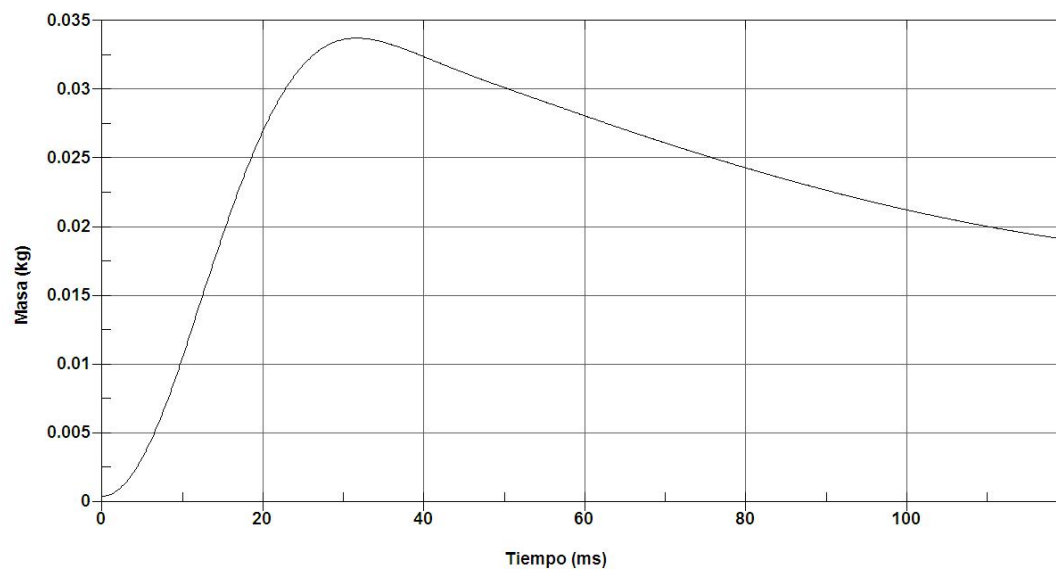
En el apartado 5.4.3, SIMULACIÓN DEL LLENADO, se explica en que consiste el modelo de simulación del airbag en el que LS-DYNA establece unas hipótesis de llenado a partir de las cuales efectúa un balance de masa y energía para obtener en cada instante los valores de presión, volumen y temperatura en el interior del volumen de control. En este apartado se van a mostrar los valores de estos parámetros del volumen de control a lo largo del proceso. Los resultados que se muestran en este apartado pertenecen al caso B.

### **6.5.1 BALANCE DE MASA**

El programa LS-DYNA efectúa un balance de masa teniendo en cuenta la cantidad de gas inicial en la bolsa, el flujo másico de entrada definido por el usuario y el flujo másico de salida a través de los orificios de salida y de los poros del tejido. En este proyecto no se ha tenido en cuenta la porosidad del tejido pero sí los orificios de salida. Si se observa la Figura 6-29, que muestra el flujo másico de salida de gas, se aprecia que hasta que no se alcanza la diferencia de presión establecida en el apartado 5.4.3 para que comience la salida de gases, el flujo de salida es nulo. El flujo másico de entrada se aporta como dato y se muestra en la Figura 5-16 mientras que el flujo másico de salida y la masa en el interior del volumen de control son resultados de la compilación. El flujo másico de salida se muestra en la Figura 6-29 y la masa en el interior del volumen de control en la Figura 6-30.



**Figura 6-29: Flujo másico de salida del volumen de control**

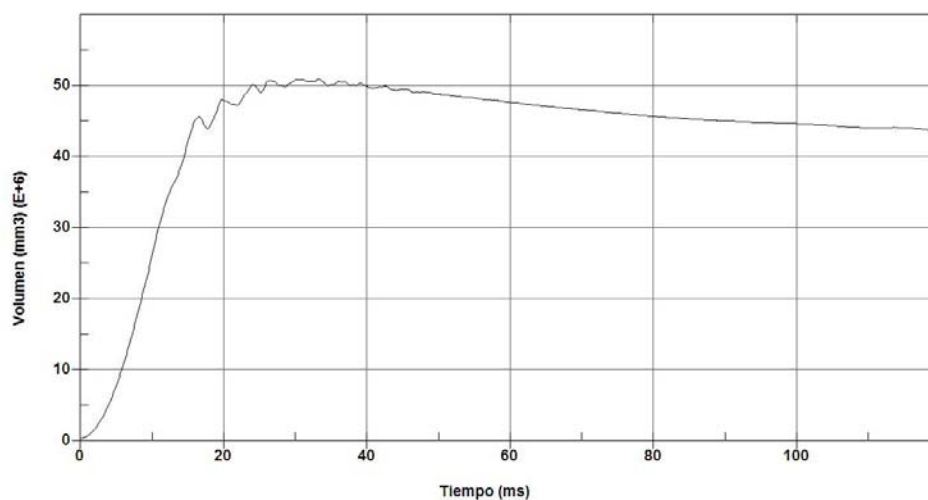


**Figura 6-30: Masa en el interior del volumen de control**

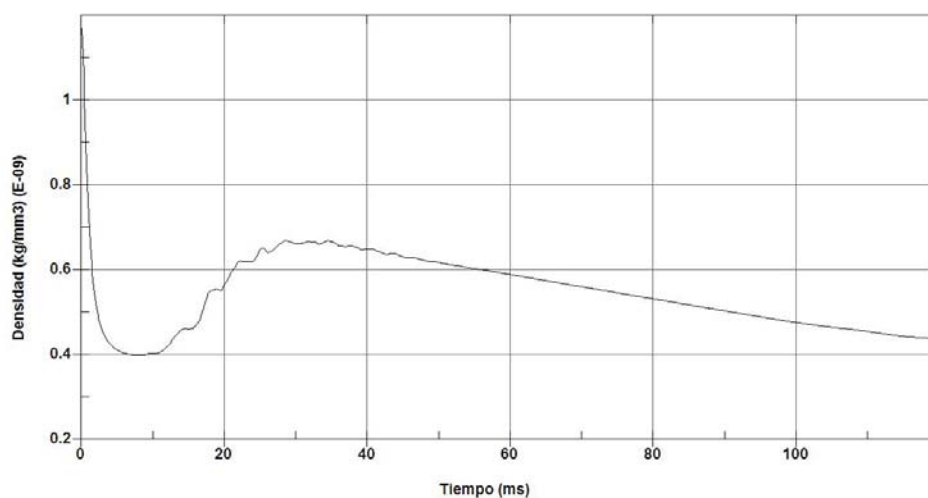


## 6.5.2 DENSIDAD

La densidad del aire en el interior del volumen de control es calculada suponiendo el comportamiento del gas en su interior como gas ideal. El programa calcula el volumen para cada instante (Figura 6-31) y junto con el balance de masa mostrado en el apartado anterior calcula la densidad del gas en el interior del volumen de control, que se muestra en la Figura 6-32.



**Figura 6-31: Volumen del volumen de control**

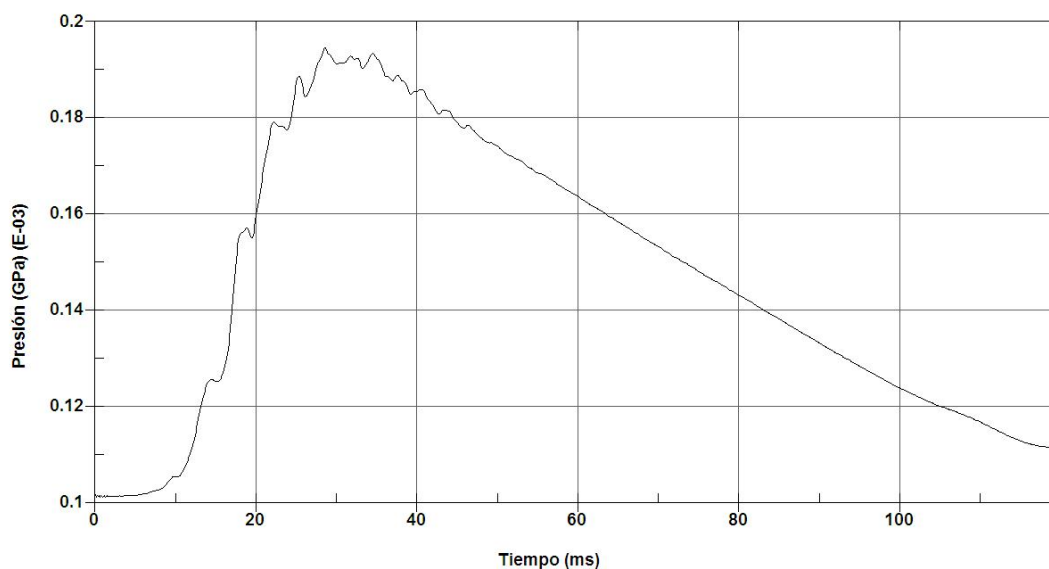


**Figura 6-32: Densidad del gas en el volumen de control**



### 6.5.3 PRESIÓN

Si se observa la gráfica de presión frente a tiempo mostrada en la Figura 6-33 y se compara con la función que define el flujo másico de entrada en el volumen de control (Figura 5-16), se aprecia que los máximos coinciden en el espacio temporal, aproximadamente en  $t=30$  ms. Como el volumen de control tiene en cuenta el flujo de salida, la presión disminuye cuando deja de entrar gas en la bolsa.



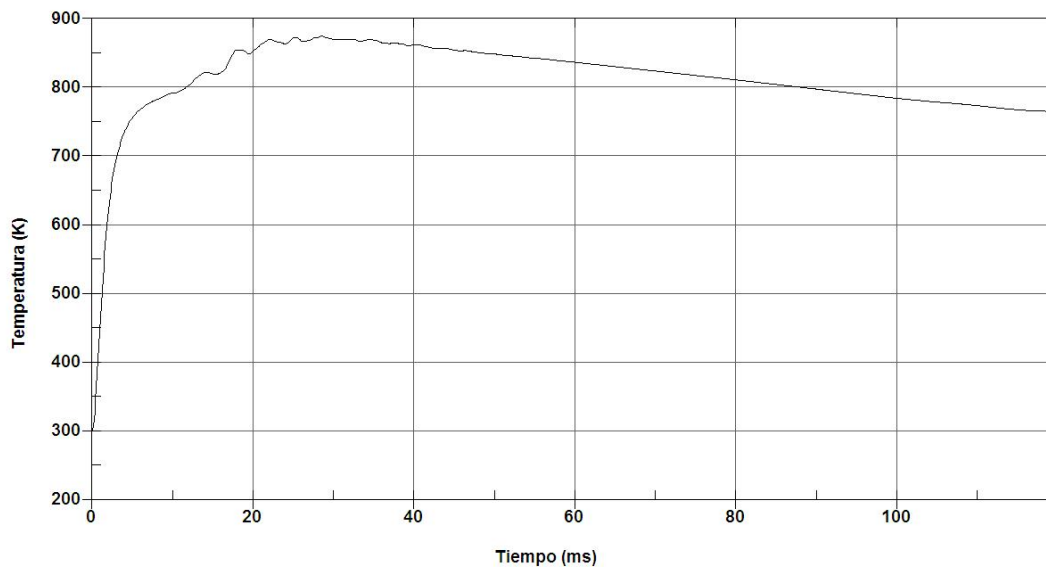
**Figura 6-33: Presión en el interior del volumen de control**

### 6.5.4 TEMPERATURA

La temperatura inicial establecida por el usuario es de 298 K (25°C) y aumenta rápidamente hasta 800 K ya que es la temperatura de entrada del gas en la bolsa. Una vez alcanzados los 800 K no se detiene y permanece constante, sino que aumenta debido al aumento de presión. En el apartado 5.4.3 se explica que una de las hipótesis de llenado es suponer el gas de llenado como gas ideal, por lo que la temperatura es linealmente dependiente con la presión. El descenso de la temperatura que tiene lugar a



partir del instante  $t=30$  ms se debe a la disminución de la presión en el interior del volumen de control.

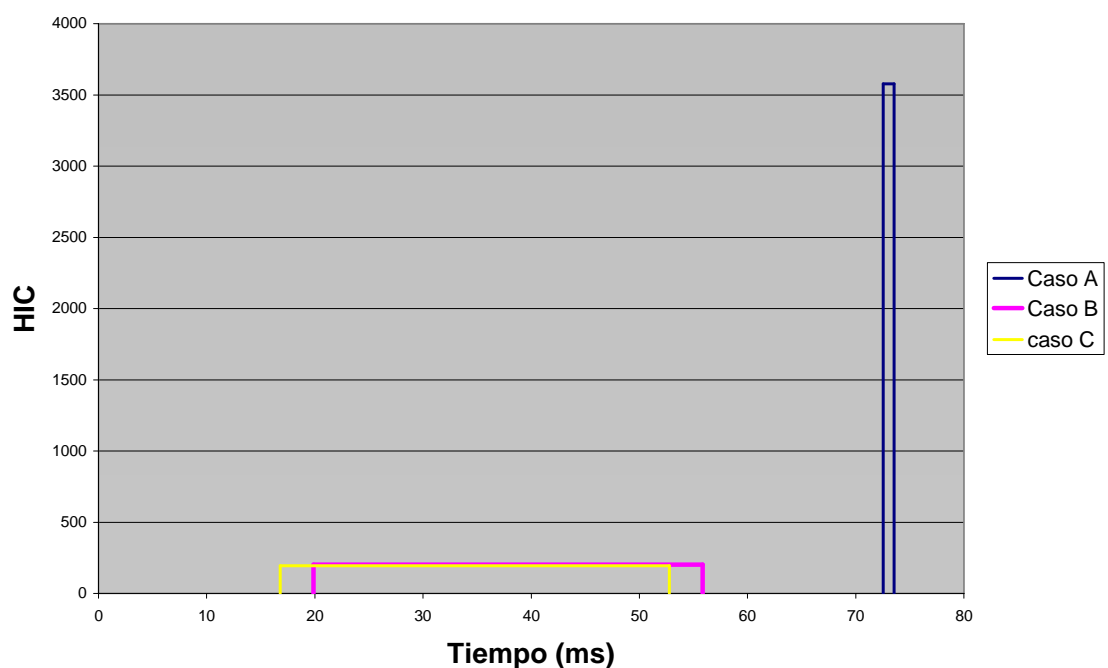


**Figura 6-34: Temperatura en el interior del volumen de control**

## ***6.6 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS***

Una vez obtenidos los resultados de cada caso se procede a compararlos en este apartado. LS-PrePost permite exportar los resultados obtenidos como texto sin formato para trabajar con ellos con otras aplicaciones como por ejemplo Microsoft Office Excel. Así, en Excel, se pueden elaborar gráficas con datos de cuantos casos se deseen, transformar los datos o simplemente visualizarlos en un entorno distinto a LS-PrePost. En este último apartado del capítulo de resultados se muestran los datos obtenidos de cada parámetro en una misma gráfica para ver las diferencias entre un caso y otro.

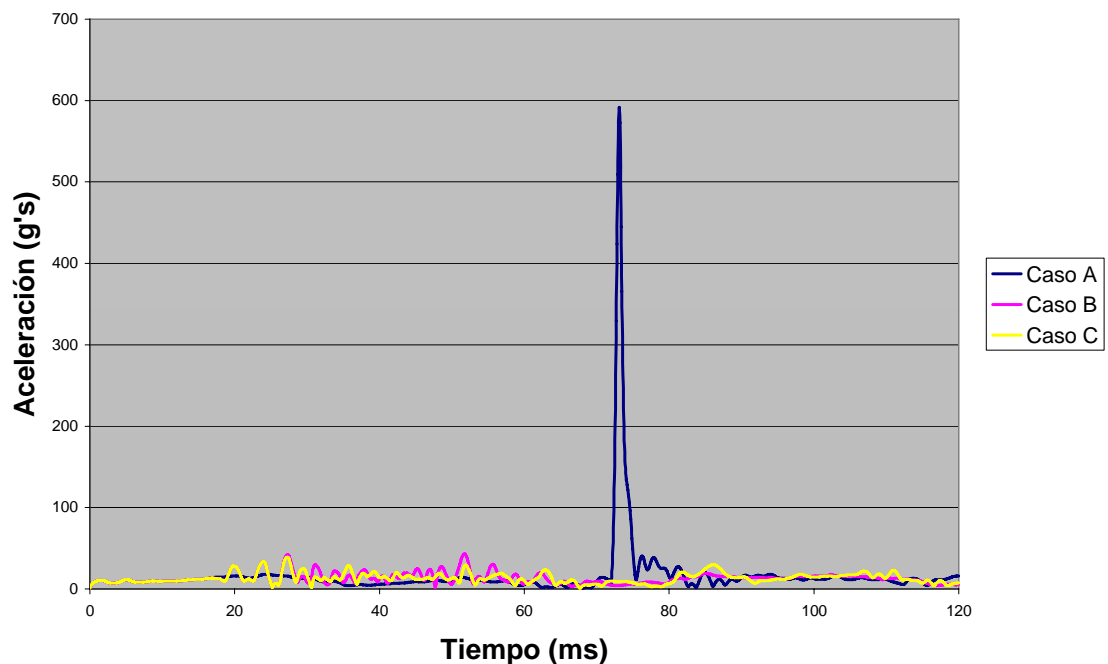
Se sigue el mismo orden que en la exposición de resultados de cada caso, por lo que en la Figura 6-35 se muestra la gráfica que contiene los resultados de los tres casos de la norma de referencia de la cabeza. Se ve claramente que la incorporación del airbag reduce considerablemente el valor del HIC y lo sitúa en menos de la mitad del valor máximo permitido (1000). Si se observa la gráfica se aprecia claramente la definición de los instantes  $t_1$  y  $t_2$  en el cálculo del HIC. En el caso A la cara entra en contacto con el salpicadero en el instante  $t = 73$  ms (aprox., se puede comprobar en la secuencia de imágenes de la Figura 6-5) y el contacto dura escasos milisegundos, mientras que en los casos B y C se consigue que el airbag entre en contacto con la cara antes para poder detener al dummy en un intervalo de tiempo mayor. En los casos B y C, como el contacto entre la cara y el dummy perdura más de 36 ms, por definición de la variante del HIC escogida, el HIC-36,  $t_2$  es el instante 36 ms más tarde de  $t_1$ . Dentro de los dos casos con airbag, B y C, se demuestra la importancia de la correcta elección de parámetros en la implementación.



**Figura 6-35: HIC-36, comparación**



El siguiente parámetro a comparar es la aceleración resultante en la cabeza que se muestra en la Figura 6-36. Al mostrar los datos de los tres casos en la misma gráfica se puede distinguir que mientras el caso A tiene un pico de aceleración cercano a los 600 g's, los casos B y C tienen una aceleración sin picos diferenciados y siempre por debajo de los 50 g's.

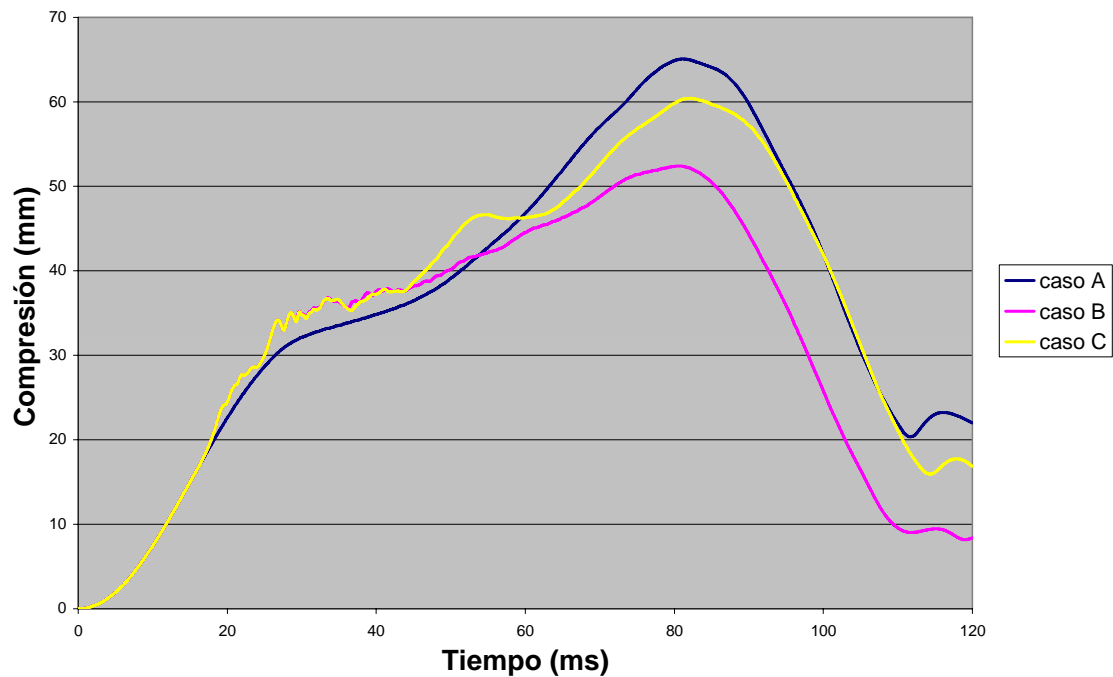


**Figura 6-36: Aceleración de la cabeza, comparación**

A diferencia de los parámetros anteriores, la compresión del tórax no está en ningún caso por debajo del máximo permitido (50 mm) según la directiva 96/79/CE, pero sí se aprecia una mejora en los resultados al incorporar el airbag. Este es uno de los parámetros en los que se ve mayor diferencia entre los dos casos con airbag, B y C. Si se observa detenidamente la gráfica se ve que hasta el instante  $t = 45$  ms (aprox.) el comportamiento de la compresión en el tórax de los casos B y C es muy semejante, pero distinto al caso A. A partir del instante  $t = 45$  ms el comportamiento entre los casos B y C comienza a diferir debido a las propiedades del contacto con el asiento. En los casos con airbag la

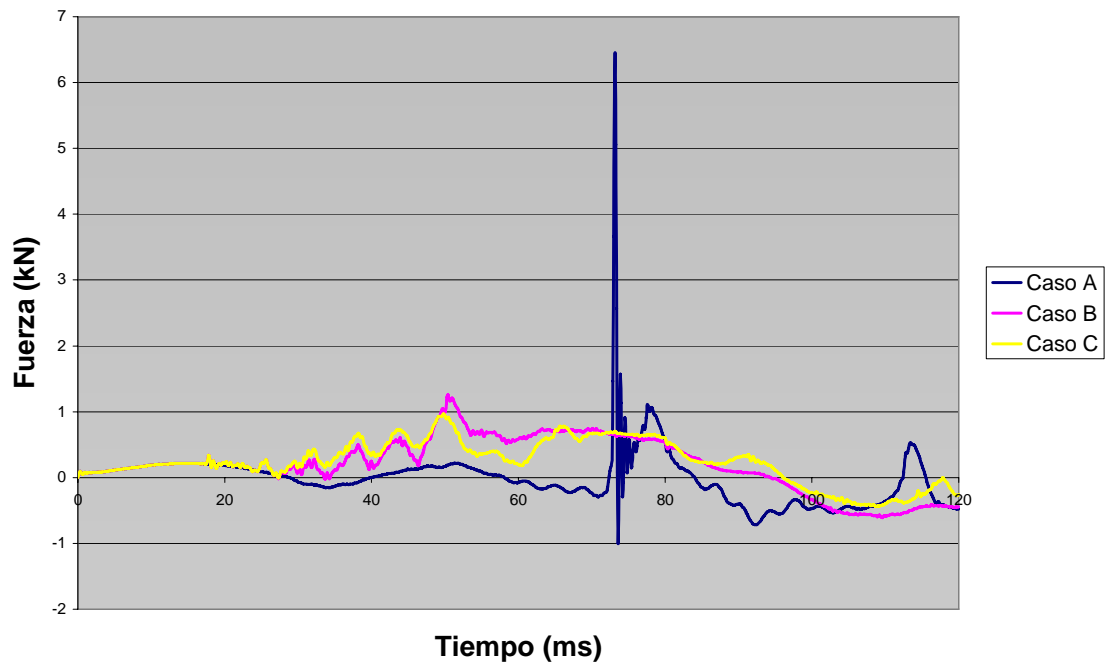


compresión en el tórax es mayor al principio y menor al final que en los casos sin él, esto se debe a que el airbag comienza a actuar antes y lo hace de una forma menos localizada.

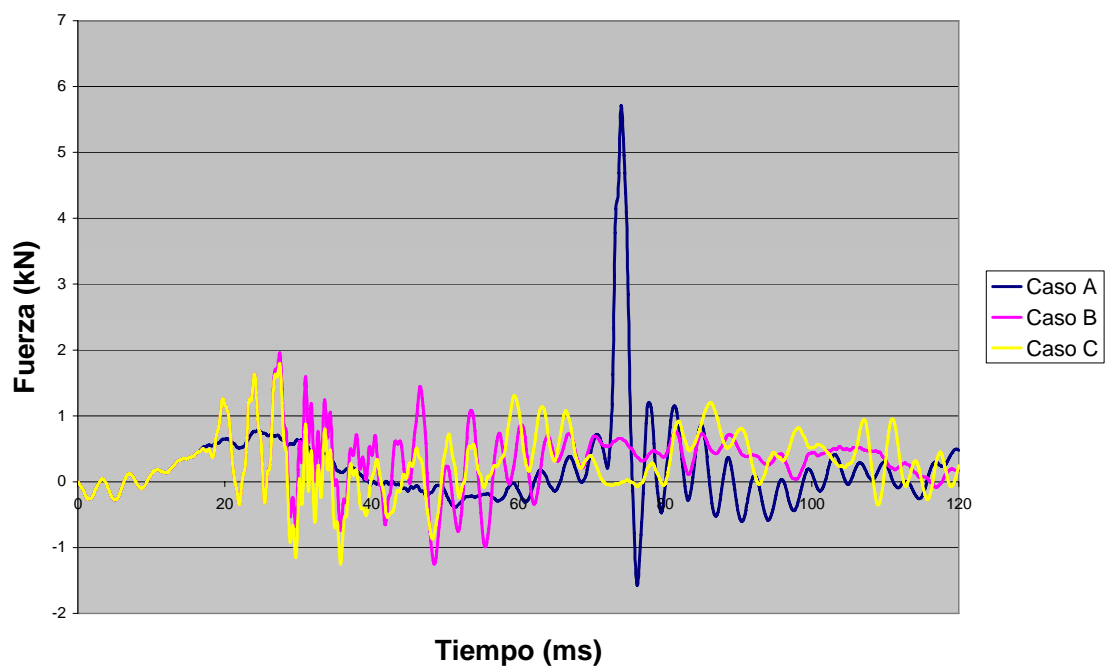


**Figura 6-37: Compresión en el tórax, comparación**

Tanto en la cisión como en la tracción del cuello mostrados en la Figura 6-38 y Figura 6-39 respectivamente, se puede observar de nuevo los picos de esfuerzo que se generan por el impacto entre el salpicadero y la cabeza en el caso A en el instante  $t = 73$  ms. En los casos B y C se observan comportamientos semejantes pero con valores ligeramente diferentes.



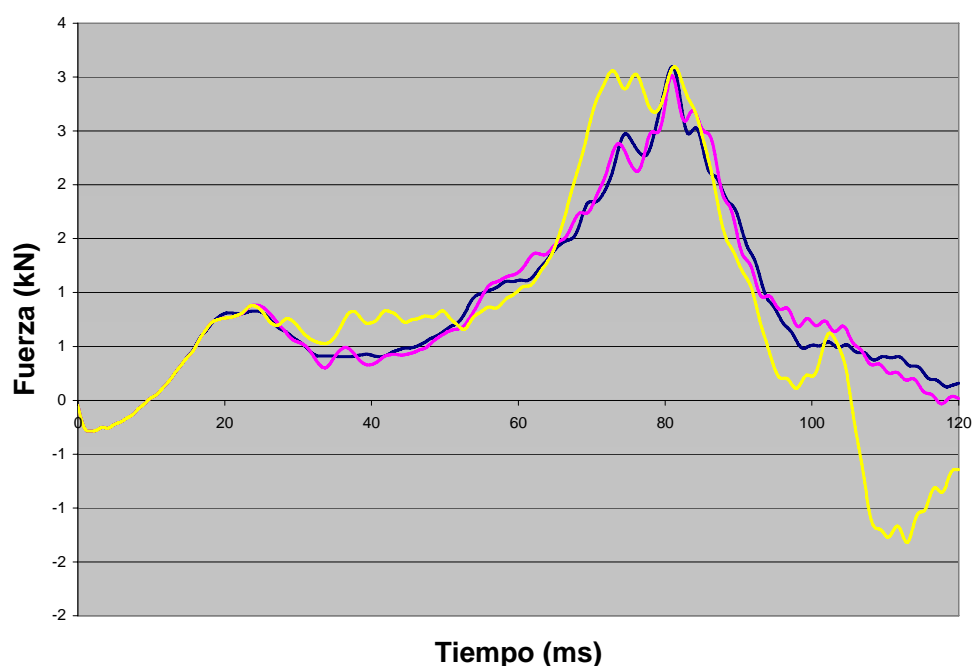
**Figura 6-38: Cisión en el cuello, comparación**



**Figura 6-39: Tracción en el cuello, comparación**



El parámetro que confirma la importancia de definir correctamente el contacto entre el asiento y el dummy es la fuerza ejercida en el fémur. Si se observa la Figura 6-40 se puede ver como los casos A y B a pesar de ser bastante diferentes ya que uno tiene airbag y el otro no, tienen comportamientos muy semejantes. En cambio si se observan los casos B y C que, aparentemente guardan mayor semejanza entre sí que el caso A con el B, tienen comportamientos distintos.



**Figura 6-40: Fuerza en el fémur, comparación**

A continuación se procede a cuantificar la mejora obtenida en los valores máximos registrados de los casos B y C respecto a los del caso A expresada en tanto por ciento. Los datos están tabulados en la Tabla 6-1. El cálculo de la mejora se ha efectuado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\%mejora = \frac{\text{máximo caso A} - \text{máximo caso B ó C}}{\text{máximo caso A}} \cdot 100$$



Parámetro (unidades)	Caso A	Caso B	Caso C	Mejora, caso B	Mejora, caso C
HIC	3577	201,4	195,3	94,37 %	94,54 %
Aceleración cabeza (g's)	592	43,0	39,2	92,7 %	93,4 %
Compresión del tórax (mm)	65,1	52,4	60,4	19,5 %	7,65 %
Cisión del cuello (kN)	6.44	1.26	0.968	80,43 %	85,0 %
Tracción del cuello (kN)	5.79	1.96	1.79	66,1 %	69,1 %
Fuerza fémur (kN)	3.10	3.01	3.10	2,90 %	0,00 %

**Tabla 6-1: Tabla de resultados**



## 7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

Este proyecto ha sido una primera aproximación a la implementación, procesado y posterior análisis de los resultados de problemas de impacto de un conductor que se encuentra en un vehículo turismo. Se ha simulado un choque frontal de un vehículo con sistemas de seguridad incorporados mediante los programas LS-DYNA y LS-PrePost. La principal dificultad del proyecto ha sido conseguir desarrollar el modelo de simulación debido a la complejidad de ambos programas, por lo que el modelo desarrollado es sencillo. La sencillez del modelo de simulación no ha impedido que el proceso global de un choque frontal esté representado con gran fidelidad. Principalmente se extraen dos conclusiones, por un lado la gran capacidad de simulación que ofrecen LS-DYNA y LS-PrePost y por otro lado la efectividad de los sistemas de seguridad pasiva incorporados en el modelo, el cinturón de seguridad y el airbag.

En el capítulo de RESULTADOS se demuestra la reducción del alcance de las lesiones provocadas en el ocupante de un vehículo en caso de choque



frontal. Tomando como referencia los resultados del caso carente de airbag, la incorporación del airbag supone mejoras de hasta un 90 % en los valores máximos registrados de aceleración en la cabeza, hasta un 20 % en la compresión que el cinturón de seguridad produce en el pecho, más de un 60 % en los esfuerzos de tracción registrados en el cuello y más de un 80% en los de cisión. No cabe duda de la eficacia del airbag, siempre que trabaje conjuntamente con el cinturón de seguridad.

La importancia de definir correctamente los parámetros empleados en el modelo de simulación queda reflejada en el capítulo de RESULTADOS en el apartado 6.6 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS, donde se encuentran diferencias en la evolución de los resultados de los casos B y C, los cuales son iguales excepto por la propiedad del contacto entre el dummy y el asiento. Las diferencias son de un 15 % en los valores de compresión del tórax, del 10 % en la aceleración experimentada por la cabeza y de un 30% en la cisión provocada en el cuello. Los valores máximos registrados de fuerza en el fémur son semejantes pero su comportamiento en función del tiempo es diferente, se muestra en la Figura 6-40.

A partir de este proyecto es posible realizar multitud de trabajos futuros. Se pueden llevar a cabo una cantidad infinita de mejoras del modelo entrando en detalle en cualquiera de los procesos que participan en la simulación como el llenado del airbag, la actuación del cinturón de seguridad, etc... Se pueden desarrollar componentes más complejos como asientos ergonómicos con reposacabezas o añadir elementos propios de un vehículo no presentes en el modelo actual, como por ejemplo, la barra de la dirección.

Quizás la característica más llamativa de LS-DYNA sea la combinación de cálculos analíticos termodinámicos con cálculos estructurales basados en el método de los elementos finitos, gracias a la cual es capaz de simular con



gran fidelidad y sin excesivo coste computacional el comportamiento de un airbag. Actualmente hay 26 modelos distintos de airbags en el programa y cada uno de ellos está definido por una gran cantidad de parámetros, además, existe la posibilidad de incorporar sensores que activen el llenado del airbag exactamente igual que lo hacen los vehículos reales. Estudiar en detalle el comportamiento termodinámico de cada modelo, cómo influye en su funcionamiento y hacer comparaciones entre ellos ofrece un amplio campo de estudio sobre el que hacer nuevos trabajos.

En la modelización de los cinturones de seguridad es posible añadir pretensores que se activan por sensores, de nuevo igual que en los vehículos reales. Trabajos futuros centrados en este sistema de seguridad pueden ser la incorporación de pretensores y el análisis de sus efectos.

Se pueden estudiar los diferentes efectos de cada sistema de seguridad cuando se emplean dummies distintos, por ejemplo, entre adultos y niños o entre adultos de diferente estatura o peso.

Otra característica importante de LS-DYNA es que para caracterizar un parámetro frecuentemente permite definir su valor por una cifra concreta o por funciones definidas por el usuario. Obtener las funciones que caracterizan los distintos sucesos que participan en la simulación abre las puertas a trabajos futuros basados en ensayos. Funciones relacionadas con este proyecto que se podrían obtener a partir de ensayos son las funciones de carga y descarga de un cinturón de seguridad y la función de los coeficientes de descarga de los orificios de salida de un airbag. También se podrían efectuar ensayos para establecer el valor de parámetros no definidos a partir de funciones como los coeficientes de rozamiento estático y dinámico que caracterizan el contacto entre superficies.





## 8 REFERENCIAS

---

- 1 "España cae al octavo puesto en el ranking de producción mundial de vehículos" – [www.Ecodiario.es](http://www.Ecodiario.es) (junio, 2008).
- 2 "2.741 muertos en accidentes de tráfico en 2007, un 9% menos que en 2006" - Cadena Ser noticias, 02 de Enero de 2008.
- 3 "Cálculo de estructuras por el método de los elementos finitos: análisis estático lineal" Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra – Editorial Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 1991.
- 4 "Livermore Software Technology Corporation" - [www.lstc.com](http://www.lstc.com)  
(junio, 2008)
- 5 "Insurance Institute for Highway Safety" – [www.iihs.org](http://www.iihs.org) (junio, 2008)
- 6 "Seguridad vial: El airbag" Instituto de investigación sobre reparación de vehículos – Editorial centro Zaragoza, 2ª Edición, 2003.
- 7 "Safety, comfort and convenience systems" Mattes B – Editorial Robert Bosch, 1999.
- 8 "Elementos estructurales de un vehículo" Centro de Experimentación y Seguridad Vial MAPFRE – Editorial CESVIMAP, 2004.



- 
- 9** "Seguridad vial: El cinturón de seguridad" Instituto de investigación sobre reparación de vehículos SA – Editorial centro Zaragoza, 2ª Edición, 2003.
- 10** "Él método de los elementos finitos: Las bases" O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor – Editorial CIMNE, 5º Edición, 2004.
- 11** "Él método de los elementos finitos: Mecánica de sólidos" O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor – Editorial CINME, 5º Edición, 2004.
- 12** "LS-DYNA Theory Manual" Recopilado por John O. Hallquist – Editado por Livermore Software Technology Corporation, Marzo 2006.
- 13** "LS-DYNA Keyword User's Manual, version 970" Livermore Software Technology Corporation, Abril 2003.
- 14** "LS-PrePost Online Documentation, Tutorials"  
[www2.lstc.com/lspp/content/tutorials.shtml](http://www2.lstc.com/lspp/content/tutorials.shtml) (junio, 2008)
- 15** "Introducción al airbag I y II" – José Carlos Abellán Rosende, Anales de Mecánica y Electricidad. Volumen 82 fascículos I (págs. 12 a 23) y II (págs. 11 a 23), 2005.
- 16** "Fundamentos de Termodinámica técnica: primer tomo" M.J. Moran, H.N. Shapiro - Editorial Reverté, 2ª Edición inglesa, 1999.
- 17** "Development of a 50th Percentile Hybrid III Dummy Model" Cing Dao (Steve) Kan, Dhafer Marzougui y Nabih E. Bedewi - 4<sup>th</sup> European LS-DYNA User's Conference - Ulm, Alemania, 22 y 23 de mayo de 2003.
- 18** "LSTC Hybrid III Dummies – Positioning and Post-Processing" Sarba Guha, Dilip Bhalsod y Jacob Krebs, LSTC Michigan – Edición LSTC.H3.060707 BETA , Junio 2007.
- 19** DIRECTIVA 96/79/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 16 de diciembre de 1996 relativa a la protección de los ocupantes de los vehículos de motor en caso de colisión frontal y por la que se modifica la Directiva 70/156/CEE.